

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Experimentální zjištění tiskových parametrů pro dosažení kvalitního
výrobku

Experimental Detection of Printing Parameters for the Production of
a Quality Product

Student:

Ondřej Mahdal

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Jiří Kratochvíl, Ph.D.

Ostrava 2017

Zadání bakalářské práce

Student: **Ondřej Mahdal**
Studijní program: **B2341 Strojírenství**
Studijní obor: **2303R002 Strojírenská technologie**
Téma: **Experimentální zjištění tiskových parametrů pro dosažení kvalitního výrobku**
Experimental Detection of Printing Parameters for the Production of a Quality Product
Jazyk vypracování: **čeština**

Zásady pro vypracování:

1. Úvod.
2. Rozbor problematiky a současný stav.
3. Technologie výroby 3D tisku (druhy materiálu a jejich parametry pro tisk).
4. Návrh experimentu, stanovení sledovaných parametrů.
5. Vyhodnocení experimentu.
6. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] GIBSON, I, D ROSEN a B STUCKER. *Additive manufacturing technologies: rapid prototyping to direct digital manufacturing*. New York: Springer, c2010, xxii, 459 p. ISBN 1441911200.
[2] Virta, Mikael. *The Capabilities of the Fused Deposition Modeling Machine Ultimakes and its Adjusting for the Bio-medical Research Purposes*. Master of Science Thesis. Examiner: Minna Kellomäki. 2013. 107 p. Faculty of Engineering Sciences. Tampere University of Technology.
[3] Internetové zdroje www.3d-tisk.cz, www.3dhuhs.com, <http://www.thingiverse.com>, aj.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jiří Kratochvíl, Ph.D.**

Datum zadání: 09.12.2016

Datum odevzdání: 15.05.2017


doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrá, Ph.D.
vedoucí katedry




doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Mistopřisežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité poklady a literaturu.

V Ostravě 12.5.2017


podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 - školní dílo.
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo - bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдомі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě12.5.2017.....

..........

podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Ondřej Mahdal

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Nový Malín 632

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

MAHDAL, O. *Experimentální zjištění tiskových parametrů pro dosažení kvalitního výrobku: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2017, 60 s. Vedoucí práce: Kratochvíl, J.

Bakalářská práce se zabývá optimálním nastavením vstupních parametrů 3D tiskárny, které výrazně ovlivňují výslednou kvalitu výrobku. Obsah rešeršní části práce rozebírá obecnou problematiku 3D tisku jako výrobní technologie. Popisuje i moderní technologie a využití adaptivních tiskových parametrů pro vytvoření velmi sofistikovaných výrobků. Experiment je zaměřen na zjištění nastavení optimální teploty extruderu a tloušťky tiskové vrstvy. Kvalitní výrobek je pojem velmi rozsáhlý a obecný, proto byly výsledky porovnány podle přesnosti vytvořených vnějších zaoblení specifického modelu. Měření probíhalo pomocí softwarového nástroje na snímcích z mikroskopu. Výsledkem práce je zjištění vlivu tiskových parametrů na kvalitu tisku a určení nejvhodnější kombinace.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

MAHDAL, O. *Experimental Detection of Printing Parameters for the Production of a Quality Product: Bachelor Thesis*. Ostrava: VŠB - Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of machining, assembly and engineering metrology, 2017, 60 p. Thesis supervisor: Kratochvíl, J.

Bachelor thesis solves optimal setting of input parameters for 3D printer which has significant impact on final quality of a product. Search section deals with basic principles of 3D printing as a production technology. Describes modern technologies and use of adaptive printing parameters in case of creating sophisticated products. Experimental section is focused on finding optimal setup of extruder temperature and thickness of the printed layer. Quality product is an extensive and general term so ranking was based on precision of printed outer rounding on specific model. Measurement proceeded by use of software application on images from a microscope. Result of thesis is finding effect of printing parameters to the production of a quality product and detection the best combination.

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů	6
1. Úvod.....	7
2. Od počátku k současnosti.....	8
2.1 Základní vlastnosti a využití technologie v současnosti	10
3. Technologie 3D tisku	13
3.1 Základní dělení technologií podle principu výroby	13
3.2 Teoretický postup tisku	16
3.3 Používané materiály	18
3.4 Podpůrné struktury a dokončovací operace	19
3.5 Povrchové úpravy	20
3.6 Vliv tiskových parametrů na kvalitu tisku	21
4. Navrhování a využití optimalizace.....	23
4.1 Navrhování	23
4.2 Bionická struktura	24
4.3 Optimalizace sestav pro 3D tisk.....	24
5. Budoucnost aditivní výroby	26
5.1 Hybridní přístup a kombinace technologií	26
5.2 Nejmodernější technologie.....	27
6. Výhody a nevýhody aditivní výroby.....	29
6.1 Výhody.....	29
6.2 Nevýhody	30
7. Experimentální část.....	31
7.1 Použité vybavení a programy	31
7.2 Tištěný experimentální model.....	36
7.3 Použité tiskové nastavení a průběh tisku	38
7.4 Vyhodnocení výsledků.....	46
8. Závěr	53
Seznam použité literatury.....	55
Seznam příloh	58

Seznam použitých zkratk a symbolů

2D	Two-dimensional - Dvojměrný
3D	Three-dimensional - Trojměrný
ABS	Akrylonitril Butadien Styren - termoplastický kopolymer
ASTM	American Society for Testing and Materials - Americká společnost pro zkoušení a materiály
CAD	Computer Aided Design - počítačem podporované projektování
CAM	Computer Aided Manufacturing - Počítačem podporovaná výroba
CJP	ColorJet Printing - Vícebarevná tisková technologie
DLP	Digital Light Processing - Tisková technologie světlocitlivých materiálů
FDM	Fused Deposition Modeling - Tavicí technologie 3D tisku
G-code	Programovací jazyk pro souřadnicově řízené stroje
HIPS	High Impact Polystyrene - houževnatý polystyren
IPT	Autodesk Inventor Part - formát souboru
ISO	International Organization for Standardization - Mezinárodní organizace pro normalizaci
LED	Light-Emitting Diode - Dioda emitující světlo
LOM	Laminated Object Manufacturing - vrstvení lepidelného materiálu
MJP	MultiJet Printing - Tisková technologie využívající více trysek
PLA	Polylactic acid - Polylactid acid
PVA	Polyvinyl Alcohol - Polyvinylalkohol
SLA	Stereolithography - Selektivní laserové spékání
SLS	Selective Laser Sintering - Selektivní laserová sintrace
STL	Standard Triangulation Language - formát souboru 3D tisku
USB	Universal Serial Bus - Univerzální sériová sběrnice
UV	Ultrafialový

1. Úvod

Experiment pro zjištění optimálních tiskových parametrů byl proveden na 3D tiskárně EASY3DMAKER. 3D tisk je široké veřejnosti dobře známý laický název, odborně se tato technologie nazývá aditivní výroba, nebo také *Rapid Prototyping* (český výraz se běžně nepoužívá, lze jej přeložit slovním spojením „rapidní prototypová výroba“). Tyto tři názvy označují velké množství tiskových technologií, které umožňují vytvářet složité výrobky ze široké škály materiálů. Všechny takto označené technologie spojuje základní princip, kdy navržený nebo naskenovaný trojrozměrný počítačový model je vytvořen v realitě a to utvářením vrstev materiálu, které se skládají postupně jedna na druhou.

Praktická část řešené bakalářské práce se zabývá kvalitou a přesností hran o různých poloměrech zaoblení, kolmých ke stavební podložce. Pro experiment byl vytvořen specifický 3D model v programu Inventor Professional. Model obsahuje rozsah zaoblení o poloměru od 0,25 mm do 1,5 mm. Model byl vytisknut na univerzitní 3D tiskárně celkově ve dvaceti různých modifikacích. Otestovány byly teplotní limity materiálu ABS, od hodnot doporučených výrobcí tiskáren, až do extrémů. Pro každou testovanou teplotu proběhl tisk ve všech dostupných tloušťkách vrstvy. Tyto dva hlavní parametry byly systematicky měněny v průběhu testu a vyhodnocení proběhlo měřením pomocí digitálního mikroskopu.

2. Od počátku k současnosti

Může se zdát, že 3D tisk je nová technologie známá pouze několik let, protože úzce spolupracuje s vyspělou výpočetní technikou. První patent však vzniknul již před více než třiceti lety. V roce 1984 Charles W. Hull zkoumal vlastnosti fotopolymerů, což je skupina polymerů u kterých dochází ke spojení a vytvrzení při expozici UV nebo viditelným světlem. Fotopolymery byly běžně používány v inkoustových 2D tiskárnách. Charles W. Hull tyto specifické vlastnosti využívá a pracuje na technologii, která dovoluje vytvořit trojrozměrnou strukturu odpovídající digitálním datům. Rok 1986 je určitě možné bez nadsázky označit za rok zrodu technologie 3D tisku, protože Charles W. Hull získal patent na svou technologii, kterou nazval *Stereolitografie*. Aby mohl pokračovat ve výzkumu a komerčně využívat patent založil společnost 3D Systems a prezentoval svoji první funkční 3D tiskárnu pod označením SLA-1 (Stereolithographic apparatus), která byla využívána pouze na testování a další výzkum. Dodnes je k vidění jeden originální exemplář SLA-1 ve Fordově muzeu ve městě Dearborn, ve státě Michigan. [1] [2]



Obrázek č. 1 - Zařízení SLA-1 [2]

O dva roky později, tedy v roce 1988 nastal významný okamžik, společnost 3D Systems prezentovala svou první verzi veřejně dostupné 3D tiskárny SLA 250, která využívala technologie stereolitografie, zároveň došlo k výzkumu a prezentaci dalších tiskových technologií. Scott Crump založil společnost Stratasys a představil světu technologii FDM (Fused Deposition Modeling), na kterou o rok později získal patent. Carl Deckard, čerstvý absolvent magisterského studia na Texaské univerzitě v Austinu, se svými společníky založil společnost Nova Automation a získal patent na svoji technologii SLS (Selective Laser Sintering), na které pracoval již od roku 1981. [1] [3]

Od roku 1992 se začíná 3D tisk rapidně rozšiřovat do průmyslových odvětví, zvláště do automobilového a leteckého průmyslu, kde je využíván, jak naznačuje název *Rapid Prototyping*, především k rychlé, snadné a levné výrobě prototypů při testování a vývoji. Rozšíření a využití technologie 3D tisku pro průmyslovou výrobu přináší kapitál pro další rozvoj technologie, která zažívá náhlý vzestupný růst. Průlom využití 3D tisku v medicíně se datuje do roku 1999, kdy se podařilo vytisknout část orgánu, která byla následně pokryta buňkami pacienta a implantována. Navazuje další úspěch medicíny v roce 2002, kdy byla pomocí tisku vytvořena miniaturní funkční ledvina, která byla úspěšně transplantována do organismu nemocného zvířete. [1]

Další revoluce začala v Británii na univerzitě Bath v roce 2005, Dr. Adrian Bowyer založil iniciativu nazvanou RepRap. Hlavní myšlenka, která prakticky nezměněna přetrvává dodnes, byla vytvořit 3D tiskárnu pracující pod jednoduchým, upravitelným a zdarma dostupným operačním systémem, tzv. *open source software*, a také aby tiskárna byla schopna vlastní replikace většiny konstrukčních součástí. Tiskárny odpovídající teorii projektu RepRap by tím měly výrazně přispět k rozšíření i mezi laické uživatele, především díky lepší dostupnosti, snížením pořizovacích nákladů, zjednodušením konstrukce i ovládacích prvků a nahraditelností většiny dílů. První úspěch projektu je datován roku 2008, kdy je oficiálně vydána první verze replikovatelné tiskárny s příhodným názvem Darwin. Ve stejném roce společnost Objet geometries Ltd. dosahuje významného úspěchu s představením revoluční technologie s obchodním názvem Connex500. Tato technologie dovoluje současně využívat více různých druhů materiálu pro tisk výrobků. V oblasti zdravotnictví byla pomocí 3D tisku vyrobena propracovaná protéza nohy, kterou po vytištění nebylo potřeba složitě sestavovat. [1]

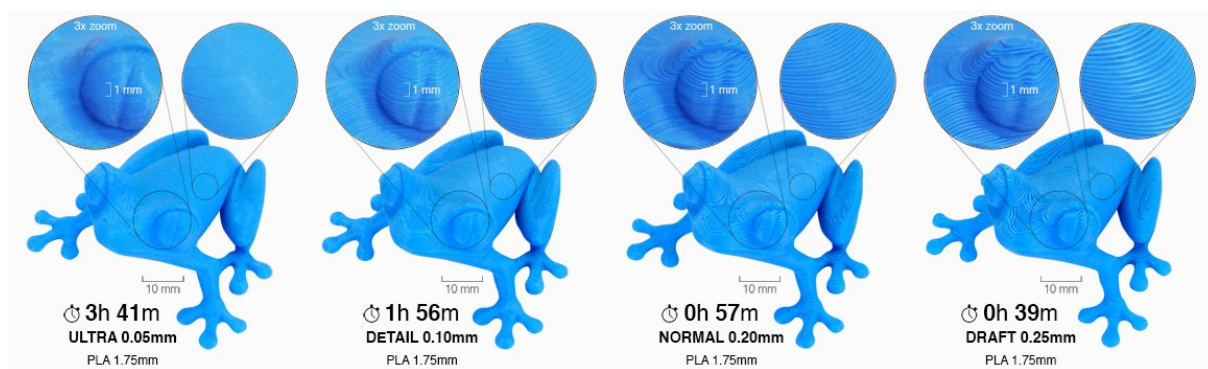
V dalším roce se dokonce uskutečnila výroba organických cév na biotiskárně společnosti Organovo, cévy byly následně úspěšně použity při transplantaci člověku. Následně v roce 2010 zavádí společnost Stratasys novou službu pro své zákazníky, kterou nazvali RedEye on Demand, aby mohli tisknout výrobky nad rozměry běžných tiskáren. Pro prezentaci svojí služby vytvořila společnost plně funkční osobní automobil, jehož vnější součásti a celá karoserie jsou vyrobeny 3D tiskem, automobil nese název Urbee. Následující rok 2011 je 3D tisk již plně rozšířený do celé řady oblastí a to nejenom průmyslových, na Cornellské univerzitě se experimentuje s tiskárnou na jídlo, na univerzitě v Brunelu ve spolupráci s univerzitou Exeter je vytvořena tiskárna na čokoládu, společnost Shapeways tiskne první textilní bikiny. První bezpilotní letadlo je v tomtéž roce vytištěno na univerzitě v Southamptonu, společnost i.materialise zavádí tisk stříbra

a 14ti karátového zlata a Vídeňská univerzita představuje nejmenší 3D tiskárnu s váhou pouze 1,5 kilogramu. [1]

2.1 Základní vlastnosti a využití technologie v současnosti

Název aditivní výroba je celosvětově standardizovaný a schválený termín Mezinárodním úřadem standardizace (ISO) a Americkým úřadem pro testování a materiály (ASTM). Podle definice termín zahrnuje všechny technologie, které dovolují převést virtuální model a sestavit jej do skutečné podoby pomocí postupného přidávání základního materiálu. Ve srovnání s konvenčními metodami dříve známých výrobních procesů (např. obrábění, frézování, ...), které fungují na principu postupného odebrání materiálu z polotovaru, je aditivní výroba velmi úspornou metodou s ohledem na využití materiálu, spotřebu energií i absenci řezných nástrojů. [4]

Tiskové technologie se z důvodu rozšíření do širokého okruhu oblastí využití musely adaptovat na přesné podmínky a požadavky uživatelů. Srovnávat profesionální průmyslové tiskárny s kompaktním domácím řešením tiskárny RepRap rozhodně nelze, ať už pomocí ceny nebo tiskových kvalit a možností. Každé řešení však má své výhody i nevýhody. Velice zajímavým a ojedinělým počinem bylo vydání miniaturní ruční tiskárny firmou WobbleWorks. Pod názvem 3Doodler vyrobili jednoduché 3D pero, které tiskne běžné termoplasty pomocí technologie FDM a je možné vyrábět modely v reálném čase, ručně, bez předcházejícího virtuálního modelu a prakticky i bez omezení rozměrů. Nevýhodou však je značná nepřesnost, která je přímo úměrná šikovnosti obsluhy. Pro určení především tvorby rychlých 3D náčrtů nebo uměleckých děl je dostatečná. Odpovídající je i cena a to okolo dvou tisíc korun. Proti tomu například profesionální tiskárna Metal X společnosti Marforged určená pro výrobu kovových součástí, za cenu pod 100 tisíc dolarů (přibližně 2,4 milionu korun), což z ní dělá nejlevnější tiskárnu ve své třídě, nabízí možnost tisknou vrstvu o tloušťce pouhých 50 mikrometrů. Tiskový parametr tloušťky jednotlivých vrstev, se dá změřit jako reálný posun na ose z, před začátkem vytváření další vrstvy výrobku a přímo určuje výslednou jakost povrchu výrobku. [5] [6]



Obrázek č. 2 - Srovnání čtyř různých nastavení tloušťky vrstvy [7]

Využívání aditivní výroby pouze pro výrobu prototypů je již dávno překonaná historie, v dnešní době si 3D tisk zajistil pevnou pozici ve stále rostoucí skupině výrobních i nevýrobních odvětví v kusové i sériové výrobě, kde značně převyšuje konvenční technologie výroby nejenom finanční a časovou úsporou, ale i možností vytisknout tvarově jinak nevyrobitelné součásti. To zahrnuje i možnost tisknout velmi komplexní nebo i pohyblivé součásti, namísto složitých sestav, u kterých bylo nutné složitého sestavení nebo svařování. [8]

Použití 3D tisku není omezeno pouze na průmyslovou výrobu. V dnešní době se tato technologie využívá například v těchto oblastech: [9]

- automobilový průmysl: plastové součásti exteriéru i interiéru, součásti motoru z kovových slitin, většina součástí závodních aut z důvodu zvýšené pevnosti bezešvých tlakových prvků,
- letecký průmysl: součásti motorů zvyšující účinnost spalování a snižují hmotnost součástí, komplexní lopatky turbíny ze žáruvzdorné oceli,
- kosmické programy: vysokotlaké nádoby a potrubí pro zvýšení pevnosti, vnější i vnitřní součásti bionickou strukturou razantně snižují váhu,
- slévárenský průmysl: nahrazení vosku - výroba modelů z termoplastu pro vytvoření forem, tisk pískových forem, [10]
- zdravotnictví: tisk naslouchátek, krevních cév, funkčních orgánů i živých tkání,
- výroba protéz: možnost upravit přesné rozměry na míru pacienta, tisk náhradních kloubů, částí poškozených kostí, komplexních náhrad končetin,
- zubní lékařství: 3D skenování a následná přesná výroba náhrad zubů,
- výroba filmových rekvizit: tisk nejrůznější složitých tvarů, barev i materiálů,
- produktový design: rychlý tisk návrhů i menších sérií výrobků nejrůznějších tvarů,

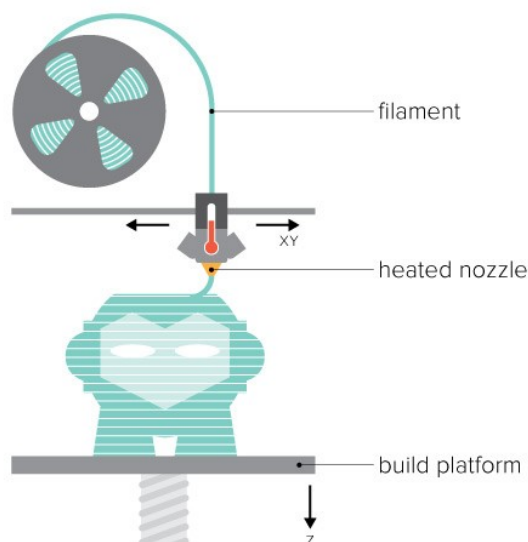
- architektura: nahrazení výroby ručních modelů jednoduchým a rychlým tiskem zmenšených virtuálních modelů i s přesnou krajinou,
- stavitelství: začátek rychlého a snadného tisku celých domů, například firma DUS Architects v Amsterdamu vytvořila 13ti pokojový dům, [11]
- umělecký design: jednoduchý tisk uměleckých děl z velké škály materiálů, vytváření struktury, kterou nelze vyrobit jinak,
- školství: jednoduchý tisk nápadů a konceptů i malosériových produktů,
- textilní průmysl: kompletní tisk bot přesně podle tvaru chodidla zákazníka, tisk různých částí oděvů podle extravagantních návrhů z textilních materiálů,
- šperkařský průmysl: tisk šperků různých tvarů s perfektní přesností z drahých kovů s výrazným snížením spotřeby materiálu i při rozměrných výrobcích,
- produkty konzumní spotřeby: například sluchátka Print+ headphones, elektronika je poslána fyzicky, ostatní díly elektronicky v podobě připravené pro tisk v barvách podle přání zákazníka, jednoduché na opravu,
- potravinový průmysl: tisk čokolády, sladkostí, těstovin, atd.,
- hobby uživatelé: různorodé domácí využití tisku, pro modeláře, výrobu dronů, vlastních součástí pro opravy, atd.

3. Technologie 3D tisku

U neodborné veřejnosti zdánlivě zázračná technologie budoucnosti budí dojem, že výroba vymodelované součásti proběhne absolutně bez zásahu obsluhy a stroj sám vytvoří kompletní součásti. Toto tvrzení nelze naprosto vyvrátit, protože spousta výrobců se v dnešní době snaží vytvořit tiskárny, které vyžadují pouze minimální nutnost obsluhy a dokončovacích operací, jedná se však především o tiskárny na domácí využití a většina parametrů se řídí automaticky. Takové minimalizované řešení rozhodně nejde použít v profesionálním prostředí, kde je potřeba dosahovat nejlepších výsledků, proto 3D tisk stejně jako každá jiná konvenční výrobní technologie podléhá určitým postupům, požadavkům a omezením. [12] [13]

3.1 Základní dělení technologií podle principu výroby

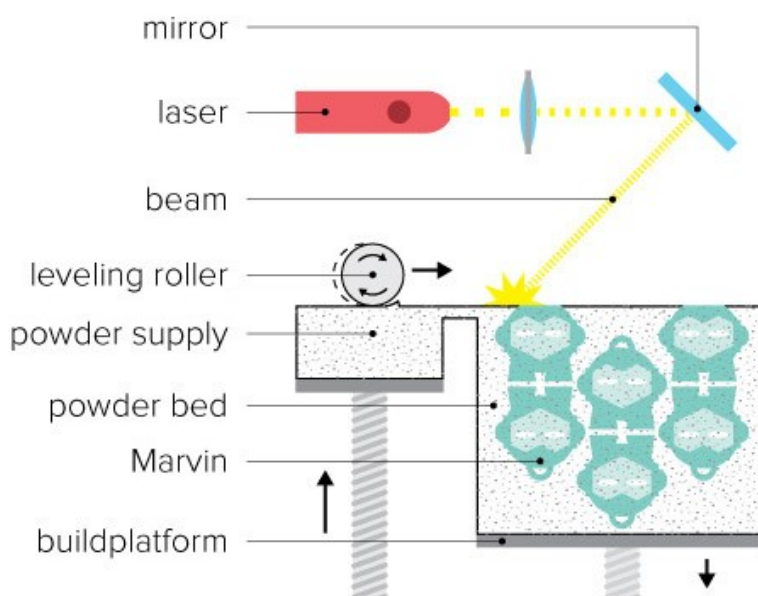
FDM a podobné - skupina technologií, která dala základ 3D tisku jako takovému a pro svoji jednoduchost jsou tyto technologie hojně využívány u hobby a poloprofesionálních zařízení. Obecně všechny tyto technologie používají trysku, pomocí které se vytlačuje roztavený plast na stavební podložku, poté se podložka sníží o parametr tloušťky vrstvy ve směru osy z a materiál se nanáší na vrstvu předchozí. Existuje samozřejmě spousta různých řešení i s více tryskami pro vícebarevný nebo vícemateriálový tisk. Jsou to technologie nenáročné na spotřebu energie i ochranu okolí a obsluhy, omezení nastává při volbě materiálu, zde je potřeba volit nižší teploty tavení. [12]



Obrázek č. 3 - Schéma FDM technologie [9]

Překlad popisků (ze shora): vlákno materiálu, tavící tryska, stavební podložka

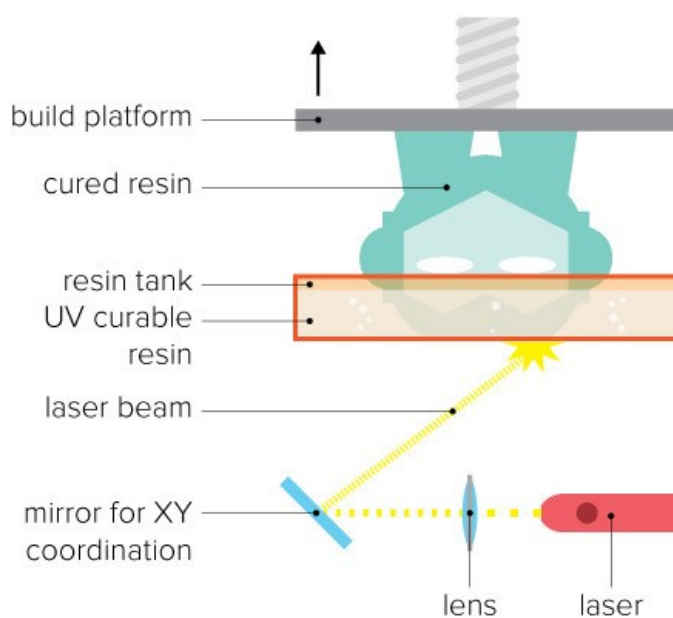
Práškové technologie - celá řada technologií spadá do této skupiny. Společný princip postupu začíná dokonalým pokrytím stavební podložky jednou vrstvou stavebního materiálu ve formě prášku. Následuje spojení materiálu v místech, kde se podle návrhu nachází vyráběný objekt, pro spojení materiálu je možné využít například spékání, pojiva a jiné. Po kompletním vytvrzení jedné vrstvy se stavební podložka sníží o parametr tloušťky vrstvy a dokonale se nanese další vrstva prášku, která se bude spojovat s vrstvou předchozí, tento postup se opakuje dokud není výrobek hotový. Po dokončení tisku je možné nespojený prášek odsát a po filtraci vrátit do zásobníku, takže nedochází téměř k žádným ztrátám. Vyráběný díl je možné očistit stlačeným vzduchem případně máčet ve speciálních pojidlech pro zvýšení pevnosti. Nejčastěji užívané technologie v této skupině jsou ColorJet Printing (CJP), které nabízí tisk ze sádrového kompozitu a až 6 milionů realistických barev, nebo Selective Laser Sintering (SLS), které nabízí velmi široké spektrum použitelných materiálů a velmi dobré výsledné fyzikální vlastnosti. Nevýhodou této skupiny technologií je riziko vznícení a exploze jemného prášku, nebo nemožnost tisknout uzavřené dutiny, protože by nebylo možné odstranit přebytečný prášek. Do této skupiny je možné zařadit i technologii Laminated Object Manufacturing (LOM), která využívá nepřetržitý list papíru, plastu nebo kovu, který se postupně skládá na vrstvy ve stavební komoře, do nichž je laserem vyřezáván obrys tvaru. [12]



Obrázek č. 4 - Schéma SLS technologie [9]

Překlad popisků (ze shora): zrcadlo, laser, paprsek, nanášecí váleček, zásobník prášku, stavební komora, Marvin (výrobek), stavební podložka

Světlocitlivé materiály - využívá třetí skupina tiskových technologií, jde o kapalné materiály, které se vytvrzují po ozáření UV světlem, viditelným světlem nebo laserem. Tato technologie se běžně používá především v menších stolních 3D tiskárnách, například pro domácí nebo kancelářské použití. Do této skupiny patří nejstarší a stále používaná technologie SLA, která k vytvrzení využívá laser, a technologie Digital Light Processing (DLP), která využívá světelný projektor. Princip postupu začíná smočením stavební podložky světlocitlivou pryskyřicí v malé nádrži, skrz stěnu nádrže je osvětlen materiál v požadovaném tvaru vrstvy. V dalším kroku se podložka posune vzhůru o parametr tloušťky tiskové vrstvy tak, aby byla smočena pouze poslední vytvrzená vrstva materiálu a pokračuje osvětlování další vrstvy, která se spojí s vrstvou předchozí. Tento postup se opakuje až do vytvoření kompletního výrobku. Do této skupiny patří i technologie MultiJet Printing (MJP), která místo smáčení nanáší miniaturní kapky pryskyřice a vytvrzuje je pomocí UV lampy. Tato technologie dokáže vytvářet velmi jemné detaily na modelech, je možné tisknout vrstvy tenké pouze 13 mikronů. Celá skupina se vyznačuje možností tisknout povrch o velmi vysoké jakosti, vynikající přesnosti a nejjemnějších detailech. V dnešní době jsou dostupné pryskyřice, které po vytvrzení mají různé odstíny barev, vysokou pevnost nebo jsou pružné. Tato skupina technologií se nedoporučuje pro velmi rozměrné výrobky. [9] [12]



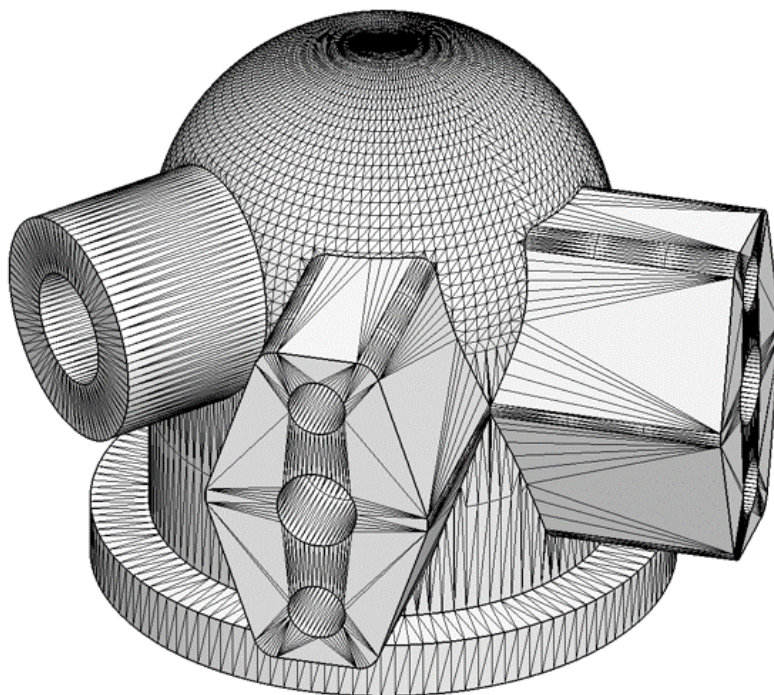
Obrázek č. 5 - Schéma technologie SLA [9]

Překlad popisků (ze shora): stavební podložka, vytvrzená pryskyřice, nádrž na pryskyřici, světlocitlivá pryskyřice, laserový paprsek, zrcadlo pro koordinaci osy X a Y, čočka, laser

3.2 Teoretický postup tisku

Existuje řada technologií aditivní výroby a pro každou aplikaci zvlášť je potřeba zvolit konkrétní postup a použité technologie podle požadavků a omezení, neexistuje jedno ideální řešení. Obecný výrobní postup se skládá z několika kroků, je však vždy, až na malé rozdíly, stejný. Základní kroky jsou popsány dále. [4]

Vytvoření modelu je první a nejdůležitější krok, který obsahuje kompletní návrh a vytvoření virtuálního modelu pomocí CAD softwaru, nebo vytvoření 3D modelu pomocí skeneru a následné úpravy. Takto vymodelovaná součást musí být především vyrobitelná pomocí zvolené technologie, druhou podmínkou jsou kótované všechny rozměry a geometrie součásti. Následuje převedení modelu do STL formátu, které nabízí většina CAD programů jako jednotný exportovaný formát 3D tisku. Tento krok vykreslí všechny povrchy modelu pomocí sítě trojúhelníků, jejichž maximální rozměry je možné upravovat a tím změnit přesnost tisku. Každý CAD software vykresluje trojúhelníky jinak a pokud je tvar modelu složitý, některé programy s vykreslením mohou mít značné problémy, pro vyhledání a nápravu chyb existuje spousta softwarových nástrojů. [4]



Obrázek č. 6 - Objekt v STL formátu [14]

Nastavení součásti, tiskových parametrů a kalibrace zařízení je důležitý krok, který přímo ovlivňuje výslednou kvalitu výrobku. Většina tiskových zařízení je spárována s ovládacím softwarem, který umožňuje číst data STL souboru, vložit objekt respektive objekty do tiskového prostoru, přesně určit jejich umístění, orientaci a zkontrolovat přesnost rozměrů. Nastavení tiskových parametrů je zásadní krok, ve kterém je možné zvolit parametr tloušťky vrstvy, rychlost stavby modelu a teplotu ohřevu materiálu. Každé zařízení vyžaduje nastavení ještě dalších specifických parametrů. Posledním krokem, který už software provádí automaticky je rozdělení objektu na jednotlivé vrstvy a vytvoření tzv. G-code. Jde o podobný textový a numerický kód, který je například potřeba i pro CNC frézování, rozdíl je v tom, že při tisku se materiál přidává. Všechna tato data je možné uložit do GCODE souboru, takže výrobek je již precizně připraven na tisk. Před každým tiskem je nezbytná ještě kalibrace zařízení ve všech osách pohybu. Je důležité si uvědomit, že tisk proběhne i bez změny parametrů a nastavení, tudíž se špatným nastavením, což většinou zapříčiní velmi špatnou kvalitu výsledku. [4]

Výroba součásti probíhá podle zvolené technologie bez zásahu obsluhy. Sledování procesu výroby není podmínkou, pouze v případě potřeby ujištění, že nedojde k chybám softwaru nebo hardwaru. Některá moderní zařízení nabízejí samostatné sledování postupu výroby a průběžné laserové měření. Většina zařízení před tiskem dokáže spočítat čas potřebný na výrobu součásti a při výrobě v reálném čase zobrazovat zbývající čas. Po dokončení výrobku je potřeba jej oddělit od stavební podložky a očistit přebytečný materiál. [4]

Nevýrobní dokončovací procesy se velice liší podle použité technologie i podle následných požadavků. Při tisku převislé stěny nebo mostu je potřeba využívat podpěrných konstrukcí, způsob jejich odstraňování záleží na použité technologii a materiálu, běžně se však neobejde bez manuálního zásahu, viz kapitola 3.4 *Podpěrné struktury a dokončovací operace*. V závislosti na požadované jakosti a dalších parametrech je možné zařadit následné povrchové úpravy, jako je broušení, leštění, obrábění povrchů a jiné, nebo napouštění materiálu pojivy a tvrdidly. V posledním kroku se nanáší nátěrové systémy, jde o úpravu vizuálních nebo funkčních vlastností a ochranu proti korozi. Lze používat i standardní penetrace nebo nátěrové systémy pro konkrétní materiály, viz kapitola 3.5 *Povrchové úpravy*. [4]

3.3 Používané materiály

Od vzniku v druhé polovině 20. století, prošla technologie aditivní výroby velmi rychlým vývojem a začlenila se do dlouhé řady výrobních i nevýrobních odvětví. Každá oblast použití si však žádá jiné materiálové vlastnosti výrobků, proto současně se šířením technologie aditivní výroby k dalším uživatelům, se rozšiřovala i škála využitelných materiálů. Dnes se může zdát paleta materiálů téměř neomezená, i přesto nadále probíhá výzkum použití dalších materiálů. Samozřejmě pro každý projekt je třeba vybrat materiál zvlášť podle požadavků. [9]

V dnešní době škála materiálů začíná u běžných víceúčelových plastů a pokračuje přes vysoce detailové pryskyřice, laserově sintrovaný nylon, nylon vyztužený spojitým karbonovým, kevlarovým nebo skelným vláknem, odolné neprůhledné Vero plasty, gumové plasty Tango s volitelnou tuhostí, průhledné plasty, pružný nárazuvzdorný polypropylen, ABS plasty vhodné na formy a nástroje, tepelně odolné plasty, fotorealistický barvitelný pískovec, písek ve tvaru forem na slévání kovů, vysokopevnostní keramiky, vosky pro vytváření snadno odstranitelných podpěr, dřevěné piliny, papírové lamináty, běžný a extrudovaný cementový beton, průhledné i různě barevné sklo. Spousta možností se nabízí i v oblasti kovových materiálů, kde je možné tisknout oceli, hliník, nerezové oceli, bronz, drahé kovy ale i slitiny, které jsou běžnými technologiemi nevyrobitelné. Tato škála se dostává i k velmi neobvyklým materiálům jako například čokoláda a jiné potraviny, textilní materiály a buněčné materiály živých organismů i krevní buňky atd. [9]

Výhody aditivní výroby zdaleka nekončí u rozsáhlé škály použitelných materiálů, naopak hlavní výhoda tkví v možnosti vytvářet výrobek pomocí miniaturních bodů a postupně po vrstvách. Tím je umožněno přesné kombinování materiálů nejenom v rámci oblastí, ale i v rámci jednoho bodu vytvořit směs více materiálů s požadovaným poměrem skladby a struktury. Přesným ovládáním tiskových parametrů je možné tvořit úplně nové nanostruktury, mikrostruktury i makrostruktury nových materiálových kategorií, které nejde jiným způsobem vyrobit. Poměr kompozitu může podléhat různým gradientům ve všech třech osách, přesně podle požadovaných vlastností. Těchto vlastností je možné využít například ve zdravotnictví pro výrobu velmi sofistikovaných kostních implantátů, které v jedné oblasti musí perfektně přilnout a přirůst ke kosti a další oblast musí být velmi odolná proti otěru. Celý implantát se vyrábí pouze jako jedna součást změnou struktury

kompozitu, bez nutnosti skládání sestavy. Na podobném principu je možné upravovat strukturu běžných kovů a je možné zvolit požadovaný gradient hustoty materiálu. [4] [15]

3.4 Podpůrné struktury a dokončovací operace

Princip utváření výrobku po vrstvách má však technologické požadavky, tím hlavním jsou podpůrné struktury. Některé tiskárny zvládají tisk i 45° převísle stěny bez nutnosti použití podpěr, avšak na úkor kvality a přesnosti stěny. Jiná situace nastává, pokud model obsahuje část, která začíná až nad stavební podložkou a k modelu je připojena nad úroveň této části, takto převíslelou část modelu rozhodně není možné bez podpěr vytvořit. Před tiskem lze výrobek nastavit do tiskového prostoru tak, aby nebyla potřeba podpěr, nebo alespoň minimálního množství, protože jde o materiálové ztráty a nárůst dokončovacích operací. Většina technologií aditivní výroby se s nutností podpěr vypořádává jiným způsobem, u některých typů 3D tisku je potřeba podpěry odstraňovat silou, proti tomu některé tiskárny zajišťují kompletní výrobu, bez pracných dokončovacích operací. [12]

Nejběžnější hobby a poloprofesionální zařízení používají technologii FDM, pokud jde o typ s jednou tryskou a jedním stavebním materiálem, tiskárna sama generuje podpůrné struktury v místech, kde jich je potřeba. Odstraňování takových struktur je velmi pracné, místa pro zabroušení mohou být těžko dostupná a většinou zůstanou patrné známky na výrobku, při neopatrném odstraňování může dojít i k poškození výrobku. Někteří výrobci přišli s pokrokem v této oblasti a nabízejí tiskárny, které zvládají tzv. multimaterial, to je schopnost tisknout více materiály, nejde pouze o barevnost a jiné teploty tavení. Toto řešení dovoluje využít materiály PVA nebo HIPS, což jsou nejběžněji používané materiály na podpůrné struktury. PVA se používá v kombinaci se stavebním materiálem PLA nebo nylonem a po tisku se odstraňuje jednoduše vodou. Materiál HIPS přilne na většinu používaných materiálů, rozpouští se však chemickou reakcí v limonenu. [12]

Velkou výhodou nabízí práškové technologie v oblasti podpůrných struktur. Při nanášení vrstev prášku do stavební komory, zůstává nespojený materiál všude okolo vytvrzeného výrobku a tím mu poskytuje potřebnou podpěru. Po dokončení výroby lze nespojený prášek odsát a po oddělení nečistot vrátit do zásobníku pro další tisk, tak nedochází skoro k žádným materiálovým ztrátám a není potřeba mechanicky odstraňovat podpěry z výrobku. Je vhodné výrobek ještě očistit, například stlačeným vzduchem, případně ponořit do specializovaných pojidel pro zvýšení pevnosti. Podobné podpůrné struktury fungují u technologie LOM, která se dá označit za předchůdce 3D tisku. [4] [12]

Tiskárny na principu technologie MJP i další ze skupiny pracující se světlocitlivými materiály, běžně využívají pro tvorbu podpěrných struktur vosk. Tisková hlava je schopná společně se stavebním materiálem utvářet i velmi malé kapičky roztaveného vosku, který okamžitě po dopadu na výrobek tuhne a okamžitě dokáže pracovat jako podpěra. Po dokončení výroby stačí celý produkt i s voskovými podpěrami vložit do speciální pece a ohřát na teplotu, při které se vosk odplaví z hotového výrobku. Složitý tvar se spoustou zákoutí však vyžaduje preciznější odstraňování vosku v ultrazvukové lázni s olejem. Tento proces probíhá bez manuálního zásahu a tím výrazně snižuje čas nutný pro obsluhu. [12]

Výborný příklad kompletního řešení aditivní výroby technologií MJP prezentovala americká společnost 3D Systems již v lednu roku 2016 a to tiskárnu do kanceláře *ProJet MJP 2500Plus*. Celkový koncept této tiskárny je velmi nenápadný a nenáročný na obsluhu a prostředí. Tiskárna je nejen schopna tisknout voskové podpěry, ale zvládá navíc tisknout z pěti různých stavebních materiálů z čehož dva jsou flexibilní. Kompletní řešení znamená, že v tiskárně je zabudována čistící sestava *MJP EasyClean*, která se stará o dokončovací operace odstranění podpěr. Obsluha pouze vyjme hotový výrobek z tiskové komory a vloží jej do první čistící nádoby s malým objemem vody, který se ohřeje a ve formě páry odplavuje vosk. Druhá nádoba zahřívá tekutinu na bázi rostlinného oleje, do které je potřeba výrobek v dalším kroku ponořit a mírně promíchat. Posléze stačí výrobek opláchnout čistou nebo mýdlovou vodou a nechat oschnout. [16]

3.5 Povrchové úpravy

Stejně jako u konvenčních metod výroby, je možné i u aditivní výroby ovlivnit výsledný povrch výrobku v závislosti na požadovaných parametrech. Například při obrábění se na výsledné mikrostruktuře povrchu periodicky opakuje nerovnost v důsledku vibrací stroje a posunu při obrábění. 3D tisk má také svá specifika, parametr tloušťky vrstvy a sklon povrchu vůči stavební podložce přímo určuje mikrostrukturu a tím i výslednou jakost povrchu. Pokud je předepsána přísnější jakost povrchu, než které lze dosáhnout zvolenou technologií 3D tisku je potřeba zařadit povrchové úpravy broušení, leštění nebo jiné. Je však nutné brát na vědomí fakt, že z důvodu vrstvení materiálu, většinou bývá pevnost výrobku různá ve směru rovnoběžném se stavební podložkou a ve směru kolmém ke stavební podložce. [8]

Poměrně velmi čerstvou novinkou je možnost kombinace technologie aditivní výroby s obráběním a využívání výhod obou technologií. Tato nová oblast se nazývá hybridní výroba a hlavním principem je vytvoření většinou kovového výrobku pomocí aditivní technologie a poté obrobení funkčních ploch konvenčním obráběním. Kombinací těchto technologií dochází k rapidnímu urychlení výroby zejména proto, že je možné tloušťku vrstvy v prvním kroku výroby nastavit na vyšší hodnotu a tím snížit pracnost. Možnost v postupných krocích opakovaně přidávat a odebírat materiál, dovoluje upravovat návrhy i v průběhu jejich realizace. Hybridní technologie nabízí nový pohled i na údržbu strojních součástí, u kterých dochází k opotřebení nebo poškození funkčních ploch. Pomocí aditivní výroby je možné tyto plochy nadstavit materiálem a poté obráběním zpřesnit rozměry a upravit jakost plochy podle požadavků. Tento přístup k údržbě je výhodný zejména u velmi rozměrných a náročně vyrobitelných součástí, jako jsou energetické turbíny nebo rozměrné hřídele, u kterých by byla výroba nového kusu finančně méně výhodná. [15] [17]

Ochrana výrobku pomocí nanášení nátěrových systémů se řídí především podle použitého materiálu. Druhým ovlivňujícím faktorem jsou požadavky na vizuální a fyzikální vlastnosti a nezbytný stupeň ochrany proti korozi. Při běžném hobby a poloprofesionálním 3D tisku se nátěrové systémy využívají pouze minimálně, hlavně z důvodu odolnosti termoplastů proti povětrnostním vlivům. V oblasti prototypové výroby není využívání nátěrových systémů běžné, pokud se využívá jiného materiálu pro odzkoušení funkčních vlastností navrhovaného dílu v sestavě. Některé kovové výrobky mohou také zůstat bez povrchové ochrany, pokud obsahují dostatečné množství antikorozních prvků ve své chemické stavbě. [4]

3.6 Vliv tiskových parametrů na kvalitu tisku

Volba optimálních tiskových parametrů má zásadní vliv na výslednou kvalitu tištěného výrobku. Při nastavování parametrů je však nutné brát v potaz řadu aspektů, které také nepřímo ovlivňují výsledek. Každá tiskárna a tisková technologie disponuje jinými parametry a ne vždy je možné všechny změnit v nastavení. Základní tři parametry, které jsou společné pro všechny typy tiskáren z principu technologie aditivní výroby, jsou tloušťka tiskové vrstvy, teplota spojovaného materiálu a rychlost tisku. [18]

Aspekty ovlivňující optimální nastavení tiskárny jsou: [18]

- použitá technologie a typ tiskárny,
- použitý tiskový materiál,
- rozměry, tvarová složitost a požadovaná přesnost výrobku,
- průměr otvoru trysky u tavících technologií,
- kalibrace tiskárny,
- klimatické podmínky okolního prostředí, ...

Tiskárny pracující na principu stejné technologie od různých výrobců nemusí být identicky zkonstruované, a proto se vyskytují drobné rozdíly nastavení parametrů. Souvisí s tím i jiné nastavitelné intervaly hodnot parametrů pro každou tiskárnu. Většinou ani výrobci tiskových materiálů nejsou jednotní v ohledu doporučené teploty tavení materiálu. Balení materiálu bývá opatřeno popisem a optimálním rozsahem teplot, nelze však jednoduše zvolit střední hodnotu, je potřeba zhodnotit i další aspekty tisku. [18]

Tvarově složité modely je nutné tisknout s nejmenším parametrem tiskové vrstvy, aby byly vytvořeny všechny navržené detaily, stejně jako modely, které mají většinu ploch nekolmých na stavební podložku, nebo různě prohnutých a zaoblených. Složité tvary nebo tzv. mosty je také vhodné tisknout menší rychlostí. Naopak pokud nejsou náročné podmínky na výslednou přesnost a kvalitu modelu, pro úsporu času se využívá větší tloušťky tiskové vrstvy a rychlejší posuvy. Proto u tavících technologií je potřeba vyšší teploty, aby se materiál procházející tryskou dostatečně ohřál. Stejně jako u trysky s větším průměrem otvoru, kde je také nutná vyšší teplota, aby se procházející materiál ohřál na dostatečnou teplotu i uprostřed vlákna materiálu. [18]

Kalibrace tiskárny ovlivňuje zejména první vrstvu modelu, protože tryska je těsně přitlačena k podložce a materiál se více rozlévá do stran, tím je první vrstva nepatrně širší. Většina tiskáren má přednastavené, že první vrstva se tiskne pomaleji a s vyšší teplotou pro lepší přilnutí na podložku. V případě potřeby přesné spodní hrany je možné zvětšit tiskovou mezeru pro první vrstvu, ale je nezbytné zvýšit tiskovou teplotu a nanést více lepidla pro dostatečnou přilnavost. [18]

Některé profesionální tiskárny pracují v ochranné atmosféře nebo v uzavřeném prostoru, aby nedocházelo k oxidaci materiálu nebo rozptýlení nebezpečného jemného prášku. Tiskárny v domácím prostředí jsou ovlivněny změnou klimatických podmínek a je nezbytné tomu přizpůsobit parametry, znatelný je rozdíl okolní teploty i o 10 °C. [18]

4. Navrhování a využití optimalizace

Pomocí aditivní výroby je možné vytvářet mnohem komplexnější výrobky v porovnání s procesem obrábění. Je to dáno charakterem procesu a také nutností přístupu obráběcích nástrojů do všech zákoutí výrobku. Pokud by bylo za úkol metodou obrábění vyrobit loď v láhvi, pravděpodobně by se postupovalo obrobením lodi a dvou částí láhve samostatně a následně spojením sestavy v jeden celek. Splnit stejný úkol pomocí aditivní výroby je velmi jednoduchá záležitost. Stejně jako u konvenčních metod je zapotřebí výkres, zde je nutné vytvořit přesný 3D model a ten zadat tiskárně k výrobě. Dokonce loď nemusí být pevně připojena k láhvi a přesto není možné ji vyjmout ven hrdlem. [8]

4.1 Navrhování

Návrh modelu výrobku je stěžejní částí výrobního postupu. Technologie aditivní výroby však dává výrobě jiné možnosti a podmínky, které je potřeba zohlednit již při samotném navrhování. Rozšiřování aditivní výroby do všech oblastí průmyslu přináší trend, na který musí reagovat firmy dodávající software. Podpora aditivní výroby CAD programy vyžaduje více než pouhé navržení a optimalizaci součástí, je potřeba doplnit další nástroje, které poskytují možnost automaticky vyplnit 3D struktury vnitřní mřížkou a optimalizovat její parametry, provést simulaci chování součástí v reálném provozu i s přiřazením tiskového materiálu a parametrů. [19]

Společnost PTC posunula podporu aditivních technologií v tomto směru ještě o krok dále. Ve svém programu Creo 4.0 vytvořila i několik dalších nástrojů pro ulehčení práce a zvýšení přesnosti. Mimo vlastní konstrukci a simulace, program nabízí i nastavení 3D tiskárny, přímý tisk dílů z prostředí Creo, vyhledávání problematických míst a jejich opravu, nastavení umístění a měřítka tištěného modelu, přiřazení různých materiálů i barev jednotlivým částem výrobku, vytvoření a optimalizaci tiskových podpěr, uložení modelu do jednotného formátu STL i s nastavením tisku, výpočet potřebného množství materiálu pro výrobek i nutné podpěry a spoustu dalších praktických nástrojů. Výhodou celistvého softwarového řešení od společnosti PTC je rozhodně to, že veškerá práce se odehrává v jednom prostředí a model je vytvořen bez převádění na jiné formáty, které mohou způsobit chyby při načítání dalším programem. Přímý tisk pomocí jednoho softwaru zaručuje rychlejší, levnější a kvalitnější přístup k řešení, které může být i silně automatizováno. [19]

4.2 Bionická struktura

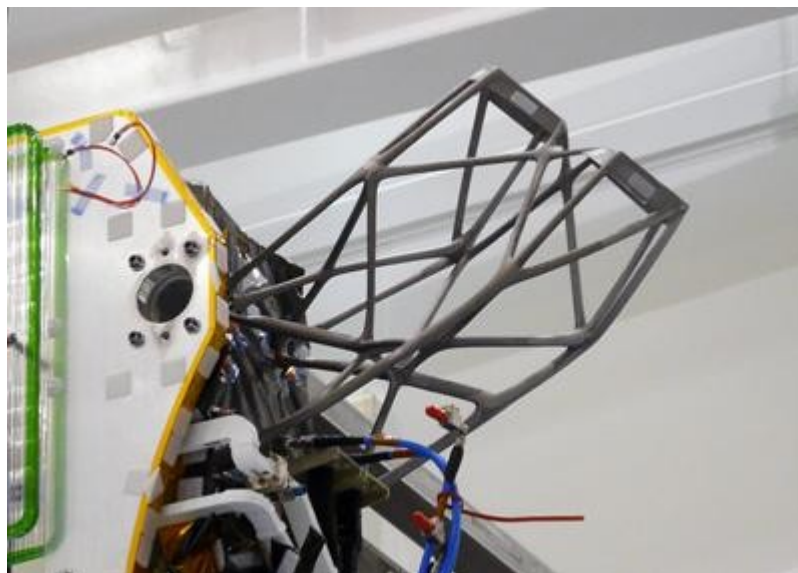
Pro využití potenciálu, který nabízí princip aditivní výroby, je však nutné již k samotnému procesu navrhování přistupovat odlišným způsobem. Konstruktor při návrhu nemodeluje přesný tvar výrobku, pouze zadává potřebné funkční plochy a namáhání součástí v provozu, poté topologickou optimalizací vytvoří bionický tvar modelu, který je maximálně odlehčený při zachování požadované pevnosti. Společnost Dassault Systèmes na své konferenci již koncem roku 2015 představila software, který je schopný topologickou optimalizaci a další simulace provádět až na úroveň molekul materiálu. Takto optimalizovaná součást je tvořena pouze z vláken, které přenášejí vnitřní napětí a proto součást může na pohled vypadat křehce a zranitelně. Podle potřeb provozu je možné součást obestavět skořepinou již při procesu výroby a vytvořit tak dutý odlehčený tvar. Váhová úspora materiálu může být i přes 70 % proti konvenčním metodám výroby. Takto precizní způsob návrhu je však časově náročný a požaduje přesné a rozsáhlé znalosti materiálu na profesionální úrovni. Vytvořené digitální dvojče výrobku, poté prochází postupně celým výrobním procesem a zaznamenává přesná data každé operace. [20]

4.3 Optimalizace sestav pro 3D tisk

Tvorba sestav vychází z potřeby tvarově složitých komponent, které by bylo velice nákladné nebo dokonce nemožné vyrobit jako jeden díl pomocí konvenčních výrobních technologií. Specifika aditivní výroby v tomto ohledu nabízí významnou výhodu, kterou je možnost tisknout tvarově složité výrobky bez ohromných materiálových odpadů z polotovaru a bez nutnosti spojovat dílčí členy sestav. [21]

Telekomunikační satelity Koreasat-7 a Koreasat-5A, které budou umístěny na oběžnou dráhu v roce 2017, jsou vybaveny nosičem antény, který byl vyroben aditivní technologií LaserCusing. Bionická součást, kterou vyrobila společnost Thales Alenia Space, o rozměrech 447 x 204,5 x 391 milimetrů, nahradila sestavu 9 dílů, uspořila 22 % hmotnosti, 30 % finančních nákladů na výrobu a zkrátil se i čas výroby. Celý takto rozměrný díl váží pouhých 1,13 kilogramů díky důkladné a opakované topologické optimalizaci a také použitím hliníkové slitiny AlSi₇Mg. Snížení hmotnosti o každý gram hraje roli při úspoře nákladů na vynesení družice na oběžnou dráhu, kdy přeprava jednoho kilogramu zátěže stojí přibližně dvacet tisíc euro. Výrobní proces probíhal na špičkové 3D tiskárně X line 1000R společnosti Concept Laser, která disponuje patentovanou technologií LaserCusing. Tato technologie je schopná pomocí postupného natavování

prášku snížit vnitřní pnutí zejména u velmi rozměrných dílů a nabízí regulaci teploty uvnitř stavebního prostoru, aby došlo k zamezení deformací. Tento projekt prokázal využitelnost 3D tisku i jako technologie výroby součástí velmi sofistikovaných, určených pro náročné podmínky, při zachování výhod snížení hmotnosti, zjednodušení výrobního i montážního procesu a úspory nákladů. [21]



Obrázek č. 7 - Nosič antény vyrobený aditivní technologií LaserCusing [21]

5. Budoucnost aditivní výroby

Odhadnout nebo předpokládat budoucnost je velmi složité a ani specialisté nezvládnou přesně a spolehlivě odhadnout trend vývoje situace. Novinky a vývoj trendu využití aditivních technologií je možné sledovat na veletrzích a prezentacích. Na konci roku 2016 proběhl druhý ročník veletrhu aditivní výroby Formnext v Německém Frankfurtu, který je zásadní událostí pro světové dění v oblasti 3D tisku. Rostoucí počet návštěvníků, vystavovatelů i výstavní plochy jasně ukazuje fakt, že je o tyto technologie zájem, navzdory kolapsu investiční i mediální bubliny, která kolem 3D tisku v předchozích letech vznikla. Dokonce je jasné, že 3D tisk jako technologie má pevné základy a neustálý růst potenciálu využití v průmyslové sféře. Organizátoři veletrhu zároveň poukazují na to, že 3D tisk se již stal naprosto seriózní technologií v průmyslu. Vystavovatelé proti předchozímu ročníku neprezentují výrobky bez užitné hodnoty jenom proto, že je lze vytisknout. Na své stánky umístili špičkové a pokrokové realizace velmi sofistikovaných výrobků i tiskáren, které jsou schopny komunikovat ve výrobní lince a využívat i principu digitálního dvojčete, tudíž odpovídají požadavkům nastupující průmyslové revoluce. Druhý ročník veletrhu Formnext ukázal skutečnost, že v oblasti profesionálního 3D tisku skončil čas her. [22]

5.1 Hybridní přístup a kombinace technologií

Při každém výrobním postupu je jistě obecný zájem u všech procesů zvyšovat kvalitu, efektivitu i produktivitu. To zajišťuje vývoj nových technologií a postupů ve většině odvětví. Některé výstupní parametry však nelze ovlivnit, protože jsou pevně svázané s technologií a proto, pokud vyžadujeme lepší výsledky, je potřeba kombinovat více výrobních technologií a využít společných výhod. Samozřejmě i aditivní výroba má svá slabá místa, která lze pomocí správného přístupu obrátit ve výhodu. [15]

Jedna z prvních kombinací technologie výrobního postupu s 3D tiskem, byl tisk pískových slévárenských forem. Aktuální hybridní technologie jsou mnohem více provázané a dovolují využít obou technologií přímo v jednom výrobním stroji bez nutnosti prostojů při manipulaci, upínání výrobku a kalibraci nástrojů. Prakticky to znamená možnost aditivní výrobou vytvořit požadovanou součást a poté s mnohem vyšší přesností obrobit funkční plochy, které mají předepsané rozměrové a jakostní tolerance. Tím je umožněno opakovaně přidávat a ubírat materiál i po vyzkoušení prototypu a tím soustavně upravovat a vylepšovat výsledek, navíc je ušetřen materiál, který by byl potřebný na

opakovanou výrobu. Stejný princip je využitelný i pro opravy součástí, u kterých by byla výroba a výměna velmi nákladná a nevhodná. [15]

První velký výrobce, DMG Mori, se intenzivně začal zajímat o vývoj hybridní výroby 3D tisku přibližně před pěti lety. Společnost vyrábí velmi sofistikovaná zařízení na základě pětiosého obráběcího centra. Tato zařízení zvládnou vytvořit produkt různými způsoby aditivní výroby, nebo začít stavět přímo na vloženém polotovaru a následně přidaný materiál obrábět požadovanou konvenční metodou. Moderní hybridní zařízení pojmu výrobek o rozměrech až 660 x 1500 mm a hmotnosti do 1,5 tuny. Nejpokročilejší hybridní stroj nabízí japonská společnost Matsuura pod názvem Lumex Avenge-25, který nabízí laserové sintrování kovového prášku a frézování. Podstatný rozdíl je v tom, že konvenční obrobení neprobíhá pouze až po kompletním navrstvení kovu, ale hned po vytvoření každých deseti vrstev o celkové tloušťce 0,5 mm. Tím je umožněno frézovat i vnitřní plochy dutých částí výrobku, které jsou později uzavřeny aditivním postupem a jsou velmi těžko dostupné, či zcela nedostupné pro následné frézování. Reakce na rozvoj hybridních technologií ze strany dodavatelů CAD a CAM softwaru je zřetelná, především společnost Siemens do své platformy NX implementuje spoustu užitečných nástrojů a simulací v oblasti topologické optimalizace i kombinace výrobních technologií. [17]

5.2 Nejmodernější technologie

S ohledem na fakt, že 3D tisk se již výrazně prosadil do většiny výrobních odvětví, ve kterých se podle požadavků vyvíjí více technologií paralelně, je obtížné pouze jednu konkrétní označit za nejmodernější. Kromě možnosti tisknout živé orgány, kovy nebo celé domy, otevírají se i možnosti výroby sloučenin materiálů, kterých nelze dosáhnout jiným způsobem, i s proměnlivým složením v průběhu tisku. Mění se však i přístup k nastavení tiskových parametrů, společnost Concept Laser nově představila ovládací softwarový nástroj CL WRX Parameter. [4] [15]

Tento nástroj dovoluje již velmi zkušeným uživatelům, kterých stále přibývá zejména v oblasti leteckého průmyslu a v medicíně, měnit všechny tiskové parametry při tisku kovů pro dosažení co nejlepšího výsledku. Běžný uživatel volí pouze mezi kvalitním nebo rychlým tiskem, předchozí software možnosti rozšířil o dalších pět nastavitelných parametrů a to výkon laseru, rychlost skenování, rozestupy stopy, velikost taveného bodu a odsazení od původní kontury. Nová aplikace Parameter odemyká kompletně všechno tiskové nastavení, které bylo doposud dostupné pouze samotným vývojářům společnosti

Concept Laser, aby i velmi zkušení uživatelé mohli dosáhnout perfektních výsledků a využít plného potenciálu aditivní metody Laser Cusing. Pro všechny zájemce o využití tohoto softwaru firma povinně zavedla školení, jak správně používat nastavení, jaké jsou komplexní spojitosti mezi některými parametry a čeho se vyvarovat, aby nedošlo k poškození tiskáren. [23]

6. Výhody a nevýhody aditivní výroby

Je nezbytné uvědomit si, že aditivní výroba se stále intenzivně vyvíjí a novinky jsou prezentovány téměř každý den. Pomocí 3D tiskáren bylo možné urychlit vývoj i výrobu prototypů a tím i rapidně urychlit vývoj nových tiskáren. Z podstaty principu technologie získáváme výhody oproti konvenčním metodám výroby, ale i nevýhody, které se snaží nekončící řada výrobců odstranit nebo minimalizovat. [9]

6.1 Výhody

Výroba tvarově složitých výrobků, které podle zákonů fyziky není možné vyrobit pomocí konvenčních metod, nebo by výroba byla neúměrně nákladná časově nebo ekonomicky. [9]

Přizpůsobení každého výrobku, možnost jednoduše upravit nebo přesně doladit každý výrobek těsně před tiskem. Takto je možné změnit každý počítačový trojrozměrný model, bez nutnosti výměny nebo výroby nových tvářecích nástrojů. [9]

Není potřeba nástrojů, ani forem. Slévárenské nebo vstřikovací formy jsou běžně využitelné pouze jednou, poté se musí znovu připravovat, to přímo zvyšuje rozpočet nezbytný pro výrobu každého dílu. 3D tisk nevyužívá nástrojů, které podléhají opotřebení jako je tomu u konvenčních metod obrábění, což snižuje náklady i nutné prostoje stroje. [9]

Rychlá a snadná výroba prototypů i cesta na trh. Jedna tiskárna je univerzální zařízení pro výrobu velké škály výrobků, které je výhodně využitelné pro designéry nebo zakázkovou a malosériovou výrobu. Nabízí se i možnost upravit produkt bez složitých změn technologického postupu. Takové univerzální řešení dovoluje zavést na trh nový produkt bez nezbytných pořizovacích investic, tudíž i s nižším rizikem ztráty. [9]

Minimální odpad proti konvenčním metodám, které pracují s polotovarem a postupným odebíráním materiálu se dostávají k finálnímu výrobku. Oproti tomu aditivní technologie postupně přidávají materiál pouze v potřebném množství a přebytečný materiál je běžně možné filtrovat a použít znovu. [9]

6.2 Nevýhody

Vyšší náklady velkosériové výroby jednoduchých produktů i při využití celého stavebního prostoru tiskárny, jsou proti konvenčním metodám tváření dané. Jelikož tradiční velkosériová výroba disponuje možností upravit polotovary a sdružit výrobní operace. [9]

Omezení materiálů, barev a povrchových úprav je dané principem výroby aditivní technologií výroby. Přesto stále rapidně přibývá použitelných materiálů pro tisk. [9]

Omezená pevnost a odolnost z důvodu utváření výrobku vrstvu po vrstvě. Výsledný materiál má anizotropní vlastnosti v závislosti na orientaci ve stavebním prostoru tiskárny. Tato negativa odbourávají technologie, které jsou schopné souběžně při 3D tisku prokládat výrobek nepřetržitými vlákny karbonu, sklolaminátu nebo kevlaru. [9]

Nižší přesnost než dosahují konvenční metody obrábění. Profesionální tiskové technologie dosahují přesnosti 20 až 100 mikronů. Tuto vlastnost lze eliminovat následným obrobením. [9]

7. Experimentální část

Řešená bakalářská práce je zaměřena na zjištění, jaký vliv má změna tiskových parametrů na kvalitu povrchu tištěného modelu. Dva nejdůležitější faktory na použité tiskárně, které zásadně ovlivňují přesnost výroby, jsou teplota trysky a tloušťka tiskové vrstvy. Původní nastavení teploty bylo zvoleno podle doporučené hodnoty pro použitý materiál a další vzorky byly tvořeny s teplotním rozdílem 10 °C, až do dosažení maxima a minima, kdy byl tisk ještě na pohled kvalitní a udržitelný. Pro druhý parametr, tloušťku vrstvy tištěného materiálu, nabízí zvolená tiskárna pouze tři možnosti. Vyzkoušeny byly kombinace pro sedm různých teplot a všechny tři tloušťky tiskové vrstvy. Pro sledování kvality povrchu byl vytvořen specifický model, který nabízí škálu vnějších zaoblení i se zkosením, pro vyšší tiskovou náročnost. Měření proběhlo na povrchové vrstvě výrobku, proto model nemusí být příliš rozměrný, to i z důvodu úspory času a materiálu. Vyhodnocení proběhlo pomocí digitálního mikroskopu a následným softwarovým měřením nepřesností.

7.1 Použité vybavení a programy

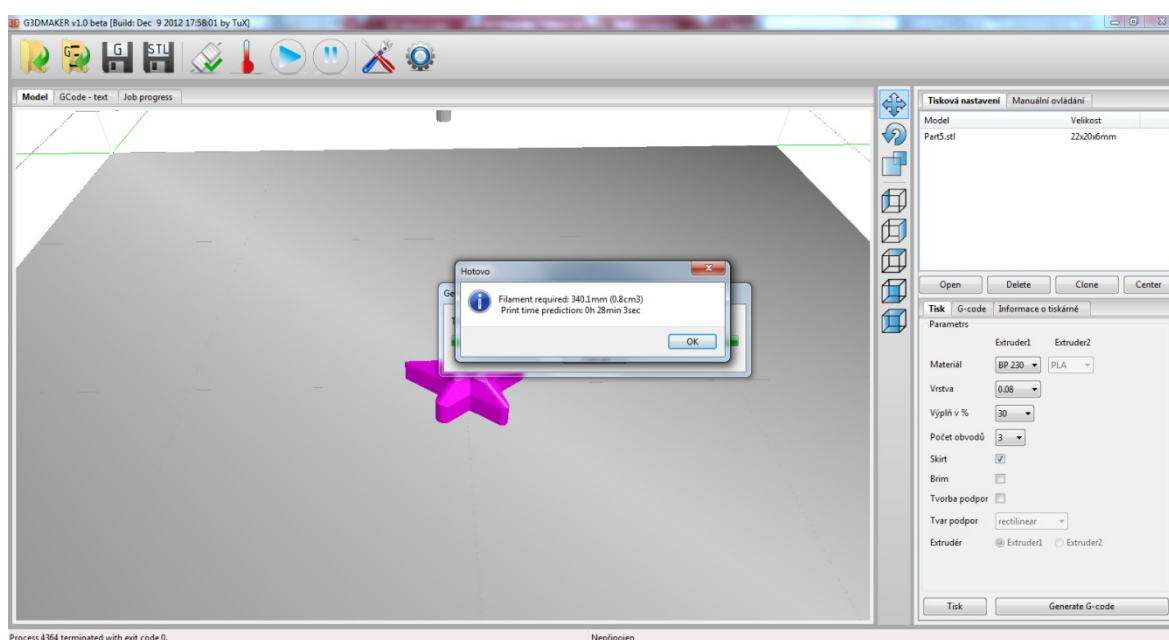
Realizace experimentu proběhla stejným postupem, jak je popsáno výše, v kapitole 3.2 *Teoretický postup tisku* a následně bylo provedeno měření a vyhodnocení pomocí specializovaného softwaru.

7.1.1 Autodesk Inventor Professional 2012

Pomocí studentské verze programu Inventor Professional od společnosti Autodesk byl vytvořen specifický 3D model testované pěticípé hvězdy. Pro vytvoření modelu bylo použito nástrojů 2D skica, vysunutí, zkosení a zaoblení. Tento program pracuje se soubory ve formátu IPT. Po dokončení návrhu dané součásti byl proveden export do souboru formátu STL, který je čitelný pro většinu ovládacích softwarů 3D tiskáren. V tomto kroku je potřeba se vyvarovat exportu pomocí nástroje *Send to 3D Print Service*, protože dojde k poměrnému zmenšení modelu do krychle o rozměru 1 x 1 x 1 milimetru. Model o správných rozměrech lze získat pomocí nástroje *Export > CAD Format* a následně zvolením koncovky STL z nabídky podporovaných formátů. Nastavení exportu bylo provedeno podle programem doporučených hodnot, formát byl nastaven binární a jednotky milimetry.

7.1.2 G3DMAKER

Program G3DMAKER je ovládací software vytvořený pro zvolený model tiskárny, aby nedocházelo ke komunikačním chybám. Program umožňuje načíst STL soubor modelu a pracovat s ním. Proběhlo umístění modelu do tiskového prostoru a nastavení všech nezbytných parametrů pro tisk. Tato data je možné uložit do jednotného souboru formátu GCODE, který obsahuje kompletní informace pro ovládání tiskárny. Program G3DMAKER byl použit i pro manuální ovládání tiskárny a odeslání kompletních dat k tisku, viz obrázek č. 8. Výhodou je, že je možné v reálném čase sledovat teplotu trysky, odhadovaný čas do konce tisku, procentuální vyjádření hotové části výrobku a trojrozměrný model hotové části výrobku.



Obrázek č. 8 - Prostředí programu G3DMAKER, při odeslání dat tiskárně

7.1.3 EASY3DMAKER

Tisk modelů proběhl na tiskárně EASY3DMAKER od české firmy 3D Factories. Použitá tiskárna se řadí do skupiny pro hobby a poloprofesionální uživatele, a využívá technologii na principu FDM. Tiskárna má pevnou celokovovou konstrukci rámu a dodává se zákazníkům ve složeném stavu. Celková tuhost kostry i naddimenzované vodící tyče dodávají tiskárně přesnost a odolnost. Dále tiskárna disponuje vyhřívanou stavební podložkou, dvěma krokovými motorky pro posun na každé ose a upravitelným přtlakem trysky. Tiskárna je dodávána s nezbytným nářadím, kabely pro připojení, ovladači a ovládacím softwarem. [24] [25]



Obrázek č. 9 - Tiskárna EASY3DMAKER [25]

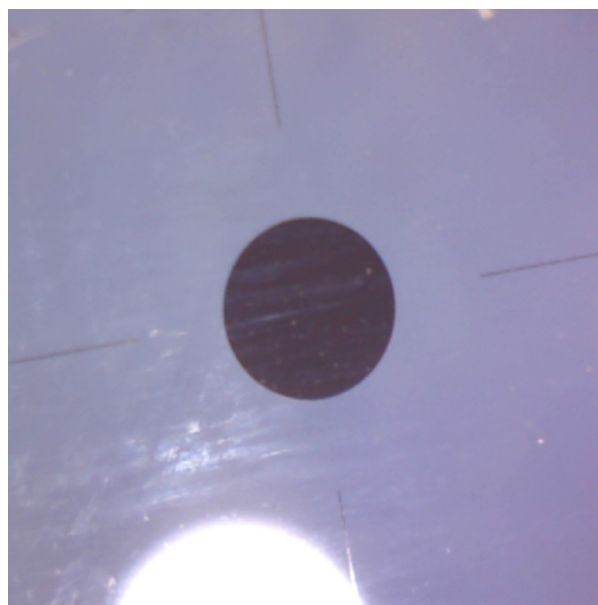
Parametry tiskárny EASY3DMAKER: [25]

- tiskový prostor: 200 x 200 x 230 mm,
- vyhřívaná podložka,
- výška vrstvy: 0,08 / 0,125 / 0,25 mm,
- průměr otvoru trysky: 0,5 / 0,3 / 0,2 mm,
- použitelný materiál: PLA / ABS,
- průměr materiálové struny: 1,75 mm,
- rozměry: 400 x 400 x 500 mm,
- hmotnost: 17 kg,
- rychlost tisku: 80 mm/s,
- rychlost přejezdu: 230 mm/s,
- maximální přesnost: 0,1 mm,
- rozhraní: USB nebo SD karta,
- napájení a příkon: 24 V / 180 W.

Použitá tiskárna měla při tisku nainstalovanou trysku s otvorem o průměru 0,3 milimetru.

7.1.4 Celestron deluxe handheld digital microscope

Pro pořízení detailních zvětšených snímků testovacího vzorku byl využit digitální mikroskop od firmy Celestron. Jde o středně pokročilý příruční mikroskop, který nevyžaduje zkušeného uživatele, ani vysoký příkon. Tento mikroskop poskytuje desetinásobné až čtyřicetinásobné zvětšení, připojení k běžnému počítači pomocí USB kabelu, 2 Megapixels rozlišení pro fotky i nahrávání videa, nastavitelný kovový stojánek a osvětlení pomocí šesti zabudovaných LED diod. Ovládání mikroskopu a pořizování snímků vyžaduje specializovaný, ale snadno dostupný software od výrobce. Kalibrace snímků proběhla pomocí skleněné kalibrační měrky s kruhovou tečkou o průměru 2 milimetry, viz obrázek č. 11. Kalibrační tečka byla vždy umístěna co nejpřesněji do stejné vzdálenosti od čočky mikroskopu jako právě snímané části modelu. Po celou dobu snímkování vzorků bylo nastaveno zvětšení desetinásobné. [26]



Obrázek č. 10 - Mikroskop Celestron [26]; Obrázek č. 11 - Snímek kalibrační měrky

7.1.5 Digital Microscope Suite 2.0

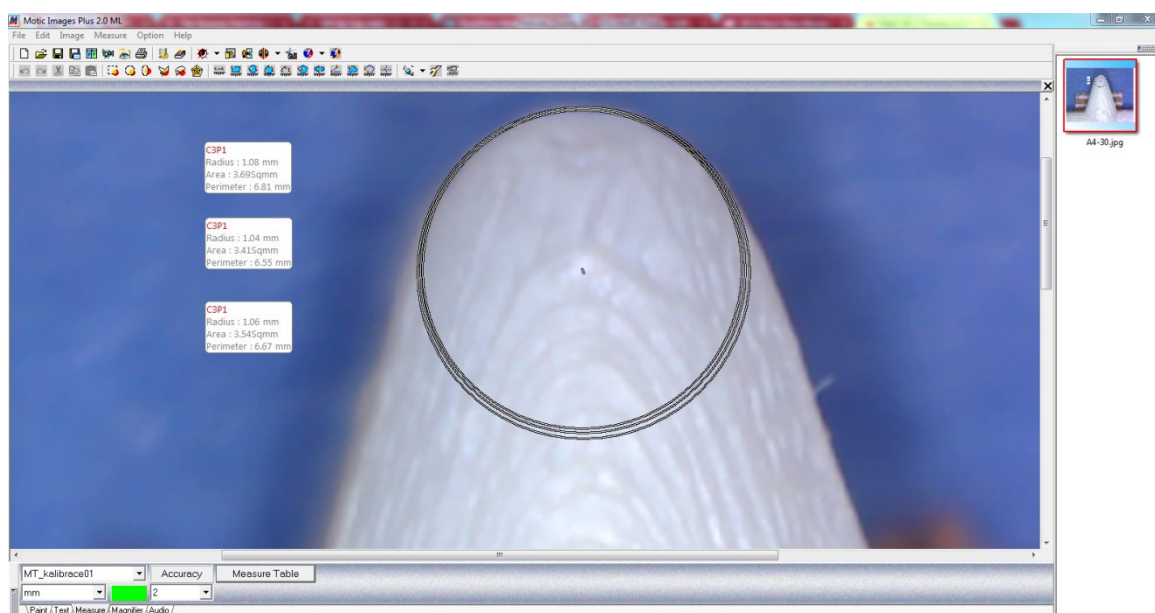
Digital Microscope Suite 2.0 je jednoduchý ovládací software pro mikroskopy firmy Celestron. Tento software je zdarma dostupný na webové stránce výrobce a zajišťuje bezproblémové spárování mikroskopu s počítačem, nastavení snímacích parametrů a ukládání snímků z mikroskopu. Rozlišení snímků bylo nastaveno na maximální hodnotu 2 560 pixelů na 2 048 pixelů, pro získání nejlepší kvality snímků, které byly uloženy ve formátu JPEG, viz obrázek č. 12.



Obrázek č. 12 - Prostředí programu Digital Microscope Suite 2.0, v nastavení

7.1.6 Motic Images Plus 2.0 ML

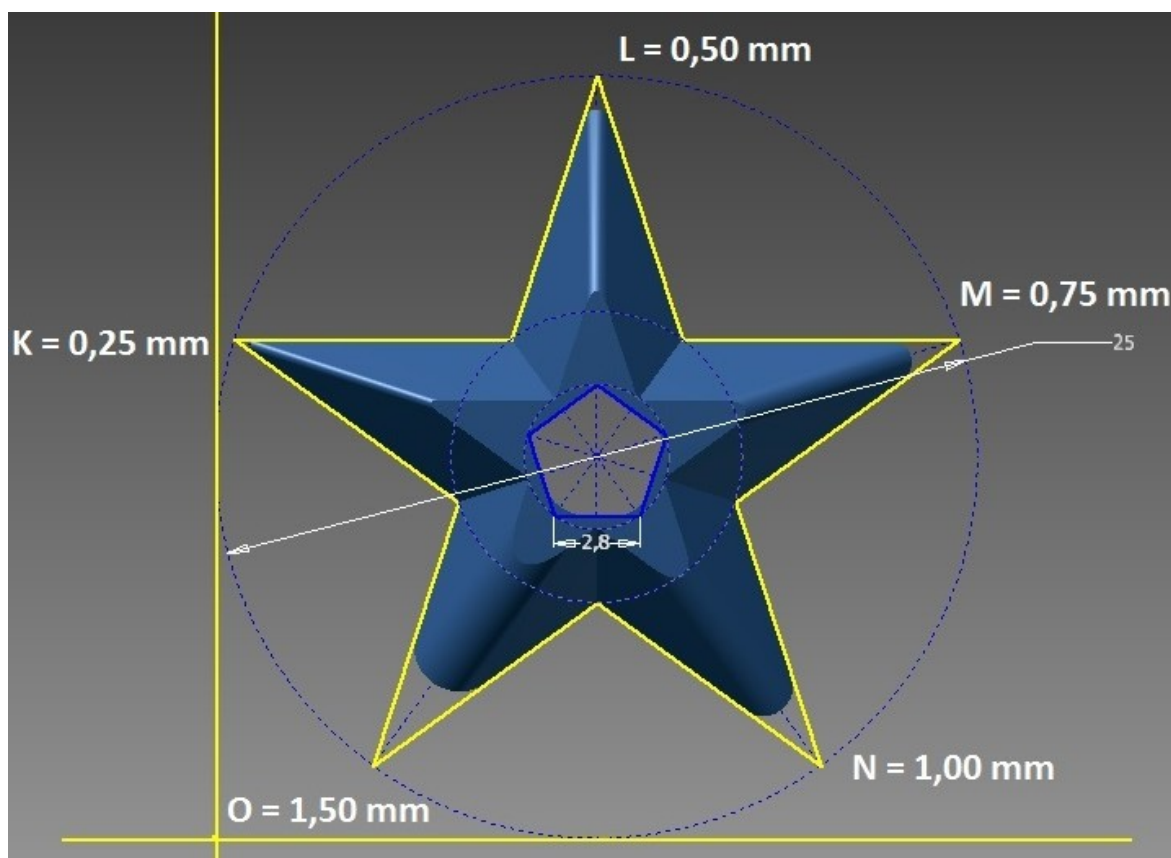
Software od společnosti Motic, který je vytvořen jako ovládací program pro jejich mikroskopy. Tento program navíc nabízí škálu nástrojů pro úpravu obrazových dat a pro měření a analýzy předmětů na snímcích. Program je zdarma dostupný na webu výrobce a je určený pro poloprofesionální užití. Zde proběhla kalibrace pomocí snímků kalibrační měřky s tečkou a byl vytvořen přesný poměr mezi pixely obrazu a reálným rozměrem. Přesnost měření byla omezena na dvě desetinná místa milimetru. Následně byl každý snímek proměřen, poloměr zaoblení byl změřen proložením kružnicí ze tří bodů, viz obrázek č. 13, bokorys cípů byl měřen jako maximální rozdíl dvou vrstev.



Obrázek č. 13 - Prostředí programu Motic Images Plus 2.0ML, při měření zaoblení

7.2 Tištěný experimentální model

Specifický model, který byl navrhnout pro tento experiment nemá žádné další využití a proto jsou jeho rozměry co nejmenší, aby se zbytečně neplýtvalo materiálem. Tvar byl vybrán se záměrem na jednom tělese vytvořit škálu vnějších i vnitřních zaoblení. Jde o pěticípou hvězdu, která je vepsaná kružnici o poloměru 25 milimetrů a ve středu je otvor tvaru hranolu s pravidelnou pětiúhelníkovou podstavou, o délce jedné strany 2,8 milimetru. Výška modelu je 6 milimetrů a celá horní hrana je zkosená pod úhlem 45° s délkou hrany 2 milimetru. Zaoblení jsou rozmístěna na každém cípu, jeho zkosené hraně i vnitřní hraně hranolu od nejmenšího po největší ve směru hodinových ručiček. Hodnoty poloměru zaoblení jsou 0,25; 0,5; 0,75; 1 a 1,5 milimetru s abecedním označením od K do O, viz obrázek č. 14. Zaoblení jsou takto volena záměrně z důvodu posouzení kvality tisku. Trojrozměrný experimentální model hvězdy je ve formátu ipt v elektronické příloze A.



Obrázek č. 14 - Náčrt modelu pro experiment s rozměry a poloměry zaoblení

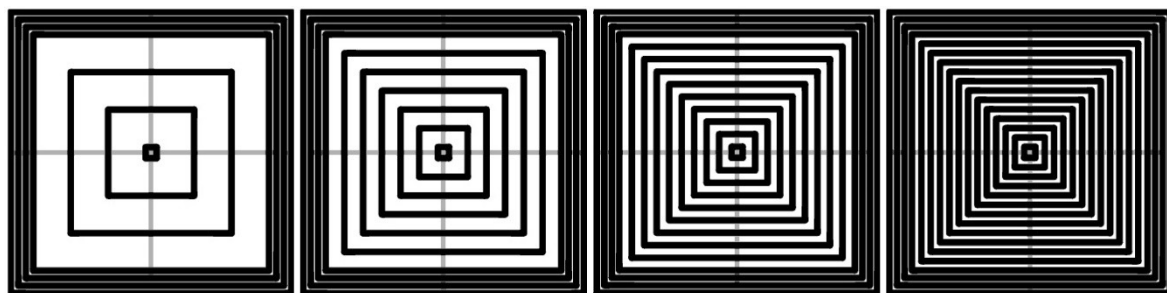
7.2.1 Použitý tiskový materiál

Tiskárna je schopna pracovat s materiály PLA a ABS. Pro experiment byl vybrán náročnější materiál ABS, který se více smršťuje při chladnutí. Proto je důležité používat lepidlo, aby první vrstva modelu dokonale přilnula k tiskové podložce a nedošlo k odlepení a tím znehodnocení výrobku. ABS je jedním ze základních materiálů na bázi ropy a proto při tavení zapáchá a uvolňuje se dráždivé látky. Výhodou je menší ovlivnění nepřesným nastavením tiskové hlavy a vysoká odolnost hotových výrobků. Tento materiál je použitelný i pro funkční produkty, protože je vlastnostmi velmi podobný vstříkovaným plastům, je velmi pevný a teplotně i chemicky odolný. Pro tisk z materiálu ABS je však nezbytně nutné, aby bylo vyhřívání stavební podložky zapnuto a chlazení bylo vypnuto. Doporučuje se tisknout menší modely, které nejdelší stranou nepřesahují 80 milimetrů. Pro experiment byl použit materiál ABS v základní bílé barvě o tloušťce struny 1,75 milimetru. [27]

7.2.2 Strategie tisku Concentric

Ovládací software tiskárny G3DMAKER nabízí nastavení sedmi různých tvarů výplně pro vnitřní stavbu a pět pro stavbu plné stěny, jde o takzvanou strategii tisku. Optimální kombinaci již hledal kolega Jan Ermis v roce 2016 ve své bakalářské práci *Strategie 3D tisku tiskárny EASY 3D MAKER*. Na základě svého experimentu vybral jako nejvhodnější strategii Concentric pro vyplňovanou dutinu i pro plnou stěnu. [28]

Název Concentric lze přeložit jako soustředný, to přesně odpovídá tvarům, které tryska vytváří uvnitř obrysu výrobku. Pokud je tvar obrysu čtvercový, do středu modelu je výplň tvořena čtverci, které se postupně zmenšují. Procento výplně udává zastavenou plochu uvnitř obrysu jednotlivé vrstvy, při sto procentech je model úplně vyplněn a při nule dutý, viz obrázek č. 15. Snížení procenta vnitřní výplně se využívá pro úsporu váhy a spotřeby materiálu. Tento vzor je výhodné použít pro snížení vnitřního napětí a deformací, zejména u malých a složitých modelů. [28]



Obrázek č. 15 - Náčrty strategie výplně Concentric, pro výplň 20, 40, 60 a 80 % [29]

7.3 Použité tiskové nastavení a průběh tisku

Nastavení tiskárny přímo určuje výslednou kvalitu a úspěšnost tisku. Protože tento experiment byl zaměřen na vliv teploty trysky v kombinaci s tloušťkou tiskové vrstvy na kvalitu výrobku, veškeré další nastavení bylo po dobu tisku stejné, aby byly výsledky porovnatelné. V oblasti strategie tisku, počtu plných vrstev a procenta výplně experiment navazuje na bakalářskou práci, kterou vypracoval Jan Ermis a nastavení bylo provedeno podle jeho výsledků. Pro nastavení rychlosti tisku, rychlostí posunů, chlazení a dalších pokročilých možností byly využity hodnoty doporučené výrobcem tiskárny, aby nedošlo ke globálnímu znehodnocení výsledků.

The image shows a screenshot of a printer settings interface, likely from a 3D printing software. The interface is divided into several sections and tabs. The top section is titled 'Print profiles' and includes tabs for 'G-code' and 'Editor materiálu'. Below this, there are two main panels. The left panel is titled 'Přesnost' (Precision) and contains settings for layer height (0.25), first layer height (100%), fill angle (45), and various retraction settings. The right panel is titled 'Chlazení' (Cooling) and contains settings for fan speed, fan speed percentage, and fan speed percentage. Below these panels are two more sections: 'Print speed' and 'Extrusion'. The 'Print speed' section includes settings for print speed, infill speed, and other speed settings. The 'Extrusion' section includes settings for extrusion width, first layer extrusion width, and other extrusion settings. The interface is designed to be user-friendly, with clear labels and input fields for each setting.

Section	Parameter	Value
Přesnost	Zvolte výšku vrstvy	0.25
	Výška první vrstvy	100%
	Vyplnit každou Ntou vrstvu	1
	Zpětný tah	
	Rychlost (mm/s)	500
	Délka (mm)	1.5
	Zdvih Z (mm)	0.3
	Extra délka po retraktu	0.02
	Minimum travel after retract (mm)	1
	Tiskové nastavení	Plné vrstvy
Fill angle (°C)		45
Tvar výplně		concentric
Tvar plné výplně		concentric
Náhodný bod začátku		<input checked="" type="checkbox"/>
Skirt		
Loops		1
Distance from object (mm)		6
Skirt height (layers)		1
Brim with (mm)		6
Chlazení	<input checked="" type="checkbox"/> Zapnout Chlazení	
	<input type="checkbox"/> Vždy zapnutý ventilátor	
	Minimální rychlost ventilátoru	35
	Max fan speed (%)	100
	Bridge fan speed (%)	100
	Enable fan if layer print time is below (approximate seconds)	11
	Slow down if layer print time is below (approximate seconds)	9
	Min print speed (mm/s)	10
	Disable fans for the first N layers	3
	Print speed	Obvod (mm/s nebo %)
Malé obvody (mm/s nebo %)		30
Infill (mm/s)		50
Solid infill (mm/s or %)		50
Top solid infill (mm/s or %)		40
Bridges (mm/s)		50
External perimeter speed (mm/s or %)		20
Other speed settings		
Travel (mm/s)		230
First layer speed (mm/s or %)		50%
Extrusion	Extrusion width (mm or %; leave zero to calculate automatically)	0
	First layer extrusion width (mm or % or 0 for default)	0
	Perimeters extrusion width (mm or % or 0 for default)	0
	Infill extrusion width (mm or % or 0 for default)	0
	Support material extrusion width (mm or % or 0 for default)	0
	Bridge flow ratio	1
	Tvorba podpor	
	Overhang threshold (°)	45
	Pattern spacing (mm)	3
	Pattern angle (°)	0

Obrázek č. 16 - Kompletní nastavení tiskárny, jednotné pro všechny vzorky

7.3.1 Volba sledovaných parametrů

Dva tiskové parametry, které se při experimentu měnily pro každý vzorek, jsou teplota trysky a tloušťka tiskové vrstvy. Druhý parametr, tloušťka tiskové vrstvy je na vybrané tiskárně omezen pouze na tři možnosti. Bylo zvoleno označení vzorků, kdy skupina A jsou vzorky o tloušťce tiskové vrstvy 0,08 milimetru, skupina B vzorky o tloušťce vrstvy 0,125 milimetru a skupina C vzorky o tloušťce vrstvy 0,25 milimetru. Z toho vyplývá, že pro různé tloušťky vrstvy můžeme zjistit jinou optimální teplotu. Číselné označení vzorku za písmenem odpovídá druhé cifře teploty extruderu pro běžnou vrstvu.

Zvolit první z parametrů je náročnější, protože tiskárna nemá softwarově omezenou teplotu trysky. Při experimentu však bylo dosaženo fyzického maxima, kdy tiskárna přestala vytlačovat stavební materiál, protože došlo k roztavení vnitřní vodící plastové trubičky a jejímu slepení s tiskovým materiálem. Výrobci tiskáren nejsou jednotní v doporučené teplotě tisku z materiálu ABS. Původní nastavení ovládacího programu G3DMAKER pro tento materiál je 230 °C pro běžnou vrstvu a 240 °C pro první vrstvu, aby lépe přilnula k podložce, kterou vyhřívá na 70 °C. Další český výrobce, Prusa Research doporučuje dokonce teplotu 255 °C a pro větší výtisky teplotu podložky až 110 °C. Easycnc.cz a 3dtiskarny.info, dva české servery o 3D tisku doporučují také teplotu 230 °C, a vyhřívání podložky na teplotu 85 °C. Pro realizaci experimentu byla zvolena výchozí hodnota teploty trysky 230 °C pro běžnou vrstvu a 240 °C pro první vrstvu. Od této hodnoty byla po krocích teplota zvyšována o 10 °C, vždy s vyšší teplotou první vrstvy o 10 °C. Maximální teplota byla dosažena při zvýšení na teplotu 270 °C běžné vrstvy a 280 °C první vrstvy, protože u vzorku C7 došlo k ucpání trysky. [30] [31] [32]

Print profiles G-code Editor materiálu							
Name	Diameter	Multiplier	First layer bed °C	Bed °C	First layer °C	Temp °C	Raft °C
ABS	1.75	1.0	70	70	240	230	40
ABSII	1.75	0.83	70	70	245	245	0
BP 210 ABS	1.75	1.0	50	70	220	210	40
BP 220 ABS	1.75	1.0	50	70	230	220	40
BP 230 ABS	1.75	1.0	50	70	240	230	40
BP 240 ABS	1.75	1.0	50	70	250	240	40
BP 250 ABS	1.75	1.0	50	70	260	250	40
BP 260 ABS	1.75	1.0	50	70	270	260	40
BP 270 ABS	1.75	1.0	50	70	280	270	40
PLA	1.75	0.94	50	50	210	200	0

Obrázek č. 17 - Tabulka materiálů, profil ABS je výchozí materiál od výrobce, materiálové profily označené BP xxx ABS jsou vytvořeny pro experiment

7.3.2 Vstupní parametry

Tisk experimentálních vzorků proběhl v laboratořích Vysoké školy báňské v průběhu dvou po sobě jdoucích dnů. Díky tomu byly klimatické podmínky téměř stejné a pokojová teplota se pohybovala okolo 21 °C. Kalibrace tiskárny proběhla oba dva dny těsně před tiskem stejným postupem. Stavební podložka byla před každým tiskem důkladně očištěna a natřena lepidlem doporučeným pro 3D tisk.

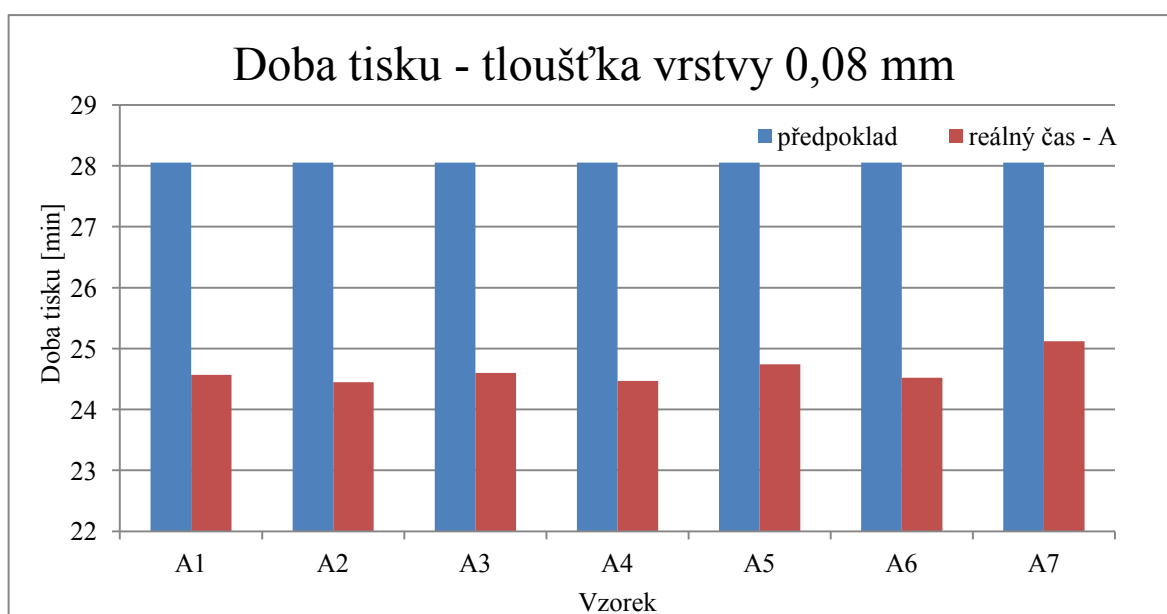
Vstupní parametry, které byly rozdílné pro každý vzorek, jsou uvedeny v tabulce č. 1. Ovládací software G3DMAKER při generování G-code vyhodnotil i přibližný čas tisku a spotřebu materiálu. Protože všechny vzorky mají stejný tvar, velikost i vnitřní výplň, pro jednotlivé tloušťky vrstvy byla předpokládána doba tisku i spotřeba materiálu stejná. Konkrétně, vzorky A měly spotřebovat strunu o délce 34 centimetru a tisk měl trvat 28 minut a 3 sekundy. Vzorky s označením B měly využít strunu o délce 33,6 centimetru a tisk měl probíhat 18 minut a 12 sekund. Vzorky C s největší tloušťkou vrstvy měly spotřebovat strunu o délce 30 centimetrů a tisk měl být hotový za 7 minut a 28 sekund. Soubory formátu gcode, pro všechny testované vzorky, jsou v elektronické příloze B.

Vzorek	Nastavení tiskárny		
	Teplota extruderu	Teplota první vrstvy	Tloušťka tiskové vrstvy
--	[°C]	[°C]	[mm]
A1	210	220	0,08
B1	210	220	0,125
C1	210	220	0,25
A2	220	230	0,08
B2	220	230	0,125
C2	220	230	0,25
A3	230	240	0,08
B3	230	240	0,125
C3	230	240	0,25
A4	240	250	0,08
B4	240	250	0,125
C4	240	250	0,25
A5	250	260	0,08
B5	250	260	0,125
C5	250	260	0,25
A6	260	270	0,08
B6	260	270	0,125
C6	260	270	0,25
A7	270	280	0,08
B7	270	280	0,125
C7	270	280	0,25

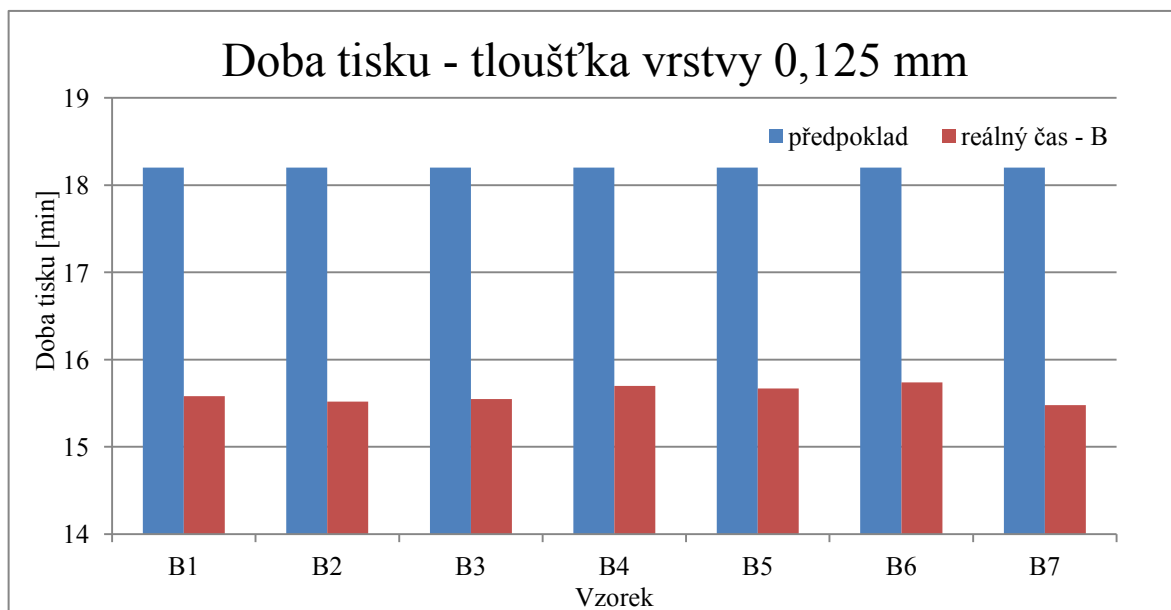
Tabulka č. 1 - Nastavení tiskových parametrů pro jednotlivé vzorky

7.3.3 Výstupní hodnoty

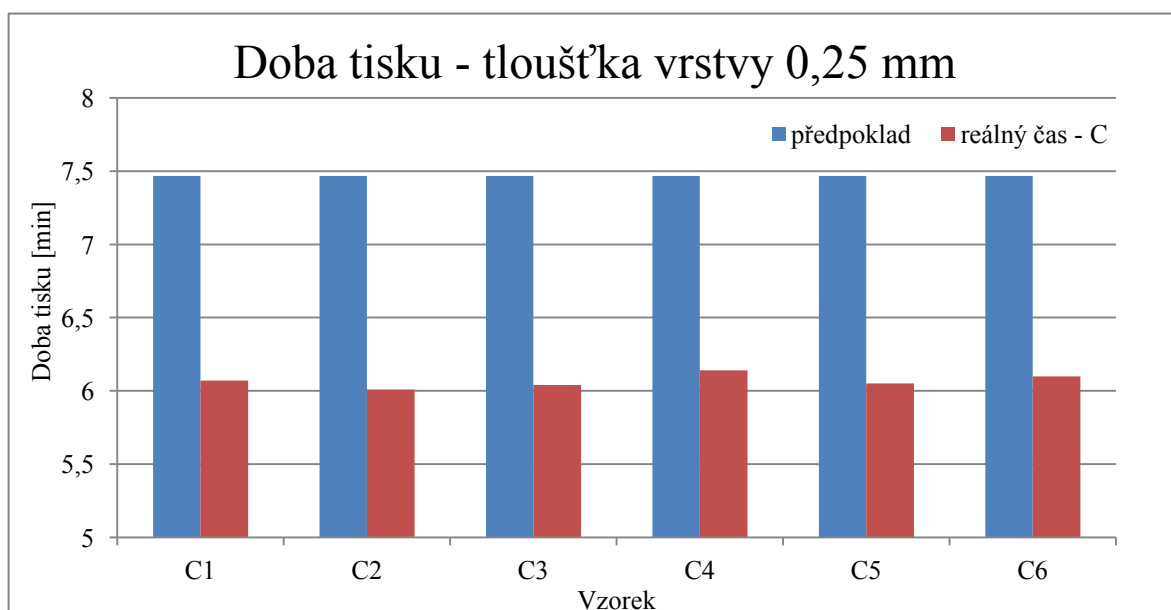
Proces tisku byl sledován kromě výsledné kvality modelů i s ohledem na spotřebu materiálu a časovou náročnost. Spotřeba tiskové struny byla měřena pomocí délkových značek na struně vstupující do vodící trubičky. Tento způsob měření je spíše orientační s přesností přibližně jeden centimetr, protože struna je v trubičce uložena volně, aby nebránila podávání materiálu tiskárně. Měření doby tisku proběhlo pomocí stopek na mobilním telefonu. Stopky byly spuštěny v okamžiku, kdy byla tryska dostatečně ohřátá a začala svůj pohyb ze základní pozice a vypnuty po dokončení celého modelu a návratu trysky zpět do parkovací pozice. Reálně naměřený čas tisku byl vždy kratší, než vypočtený ovládacím softwarem tiskárny, viz grafy č. 1 až 3. Spotřeba materiálu byla předpovězena přesněji, přesto žádné modely A a C nepřekročily plánovanou spotřebu, viz grafy č. 4 a 6. Vzorky B překročily ve čtyřech případech plánovanou spotřebu o pouhé čtyři milimetry, tudíž mohlo jít o nepřesnost měření, viz graf č. 5.



Graf č. 1 - Reálná a předpokládaná doba tisku vzorků skupiny A

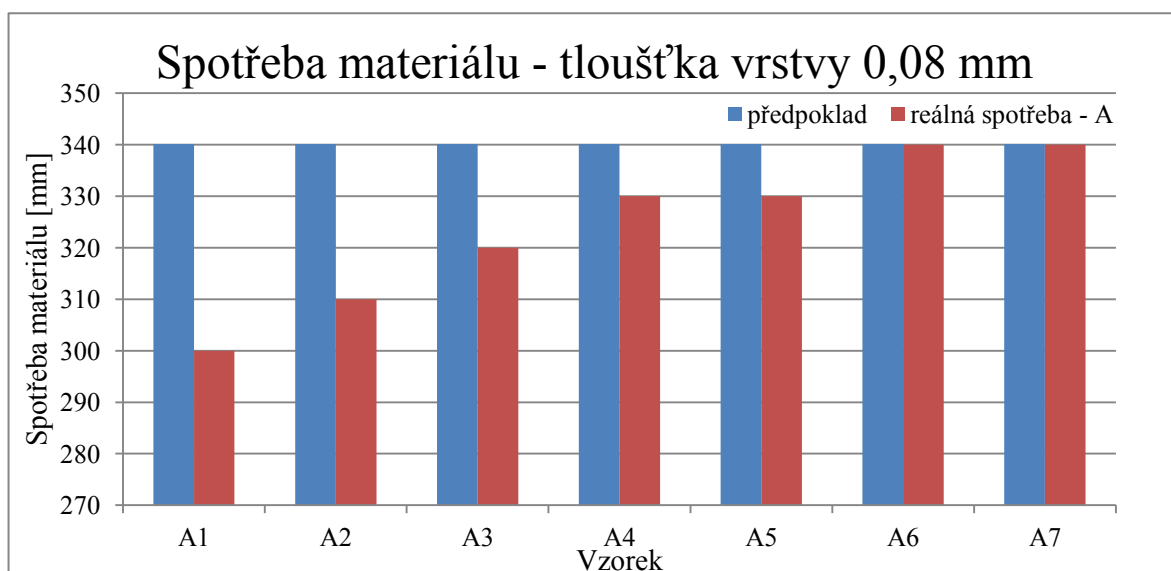


Graf č. 2 - Reálná a předpokládaná doba tisku vzorků skupiny B

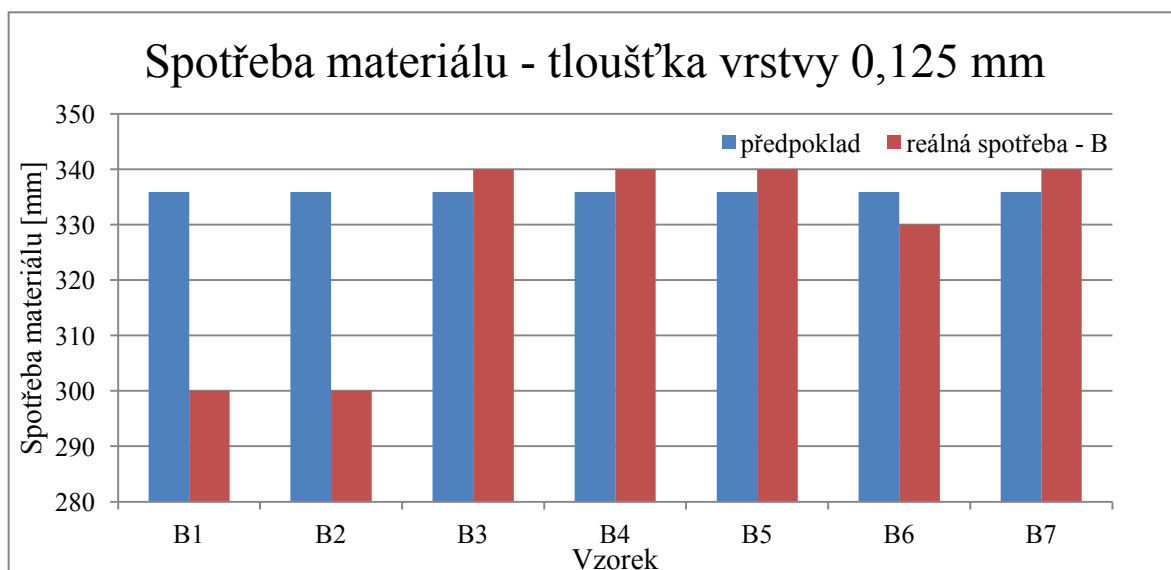


Graf č. 3 - Reálná a předpokládaná doba tisku vzorků skupiny C

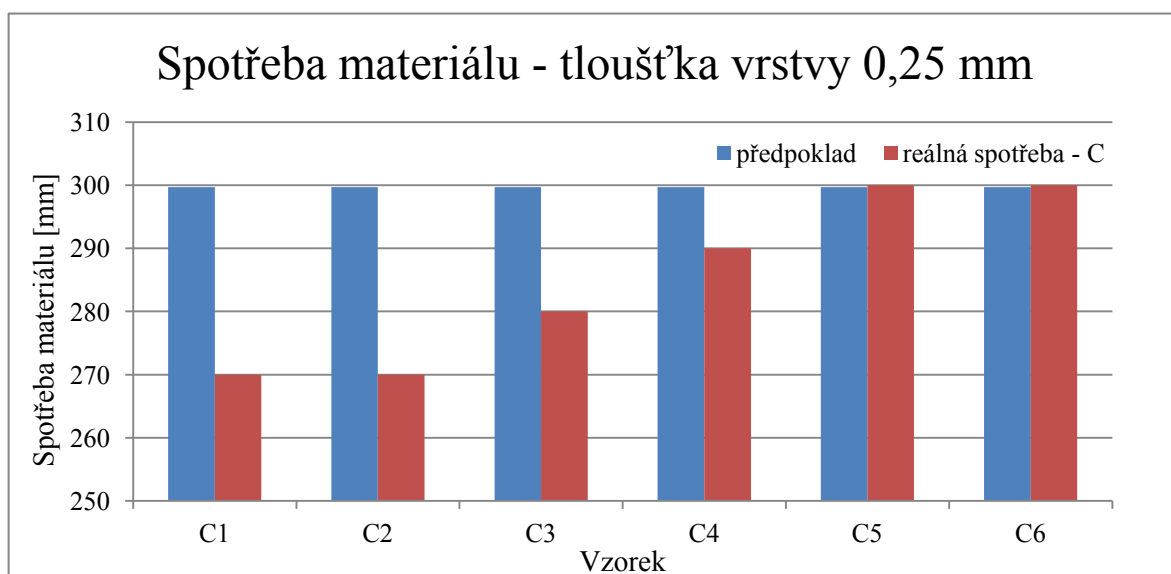
Z grafů č. 1 až 3 je jasně patrné, že trend reálně naměřeného času nevykazuje významný růst nebo klesání, takže změna teploty trysky nemá výrazný vliv na dobu tisku. Samozřejmě při větší tloušťce vrstvy se model skládá z méně vrstev a proto je tisk rychlejší a nelze porovnávat mezi sebou všechny vzorky mezi skupinami A, B a C.



Graf č. 4 - Reálná a předpokládaná spotřeba materiálu vzorků skupiny A



Graf č. 5 - Reálná a předpokládaná spotřeba materiálu vzorků skupiny B



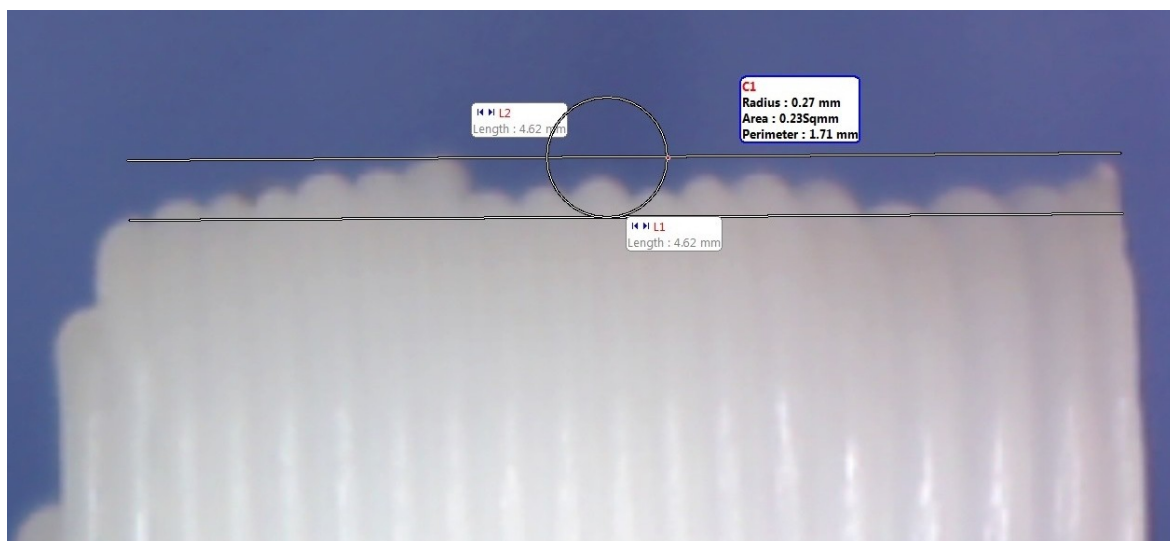
Graf č. 6 - Reálná a předpokládaná spotřeba materiálu vzorků skupiny C

Grafy č. 4 až 6 znázorňují vztah mezi spotřebou materiálu a teplotou trysky pro každou skupinu. Mírně zvýšenou spotřebu materiálu lze pozorovat s rostoucí teplotou extruderu. Z hodnot byla stanovena úspora materiálu mezi nejnákladnějším a nejhospodárnějším vzorkem v každé skupině. Pro skupiny A a B je to shodně 11,7 % a ve skupině C je to 10 %. Tuto ztrátu materiálu může způsobovat rychlejší odpařování stavebního materiálu kvůli vyšší teplotě. Samozřejmě tyto hodnoty mohou pramenit z nepřesnosti měření a doporučuji samostatný experiment, který by zahrnoval více metod měření, které by přesněji určily spotřebu materiálu. Stejně tak i tištěný model by měl být větší, aby byl rozdíl znatelnější. Bylo by dostatečné testovat pouze jednu skupinu tloušťky tiskové vrstvy. Úspora materiálu však není tak markantní a experiment je zaměřen na kvalitu hotových vzorků, tudíž se nejedná o rozhodující parametr.

Tato bakalářská práce je zaměřena na produkci kvalitního výrobku, který je posouzen podle přesnosti vytvořeného cípu vzorku. Výstupní hodnoty přesnosti je potřeba nejprve změřit a poté je možné vyhodnotit optimální tiskové parametry. Vzorky byly nasnímány pomocí digitálního mikroskopu a změřeny pomocí softwaru Motic Images Plus 2.0 ML.

Výstupní hodnota zaoblení byla měřena pomocí kružnice, kterou software vytvoří ze tří zadaných bodů náležících zaoblení. Pro každý vzorek a každý cíp hvězdy byly naměřeny tři hodnoty poloměru zaoblení, viz obrázek č. 13, které jsou zapsány v elektronické příloze C, tabulka měření vzorků. Ze tří hodnot je vypočtena hodnota aritmetického průměru, v tabulce označená velkým písmenem náležícím cípu K až O. Následně rozdílem naměřené průměrné hodnoty a teoretické hodnoty navrženého zaoblení je získána nepřesnost zaoblení, která je označena velkým řeckým písmenem delta a písmenem náležícím cípu. Tato hodnota nepřesnosti zaoblení je považována za vypovídající výstupní hodnotu a je použita pro následné vyhodnocení.

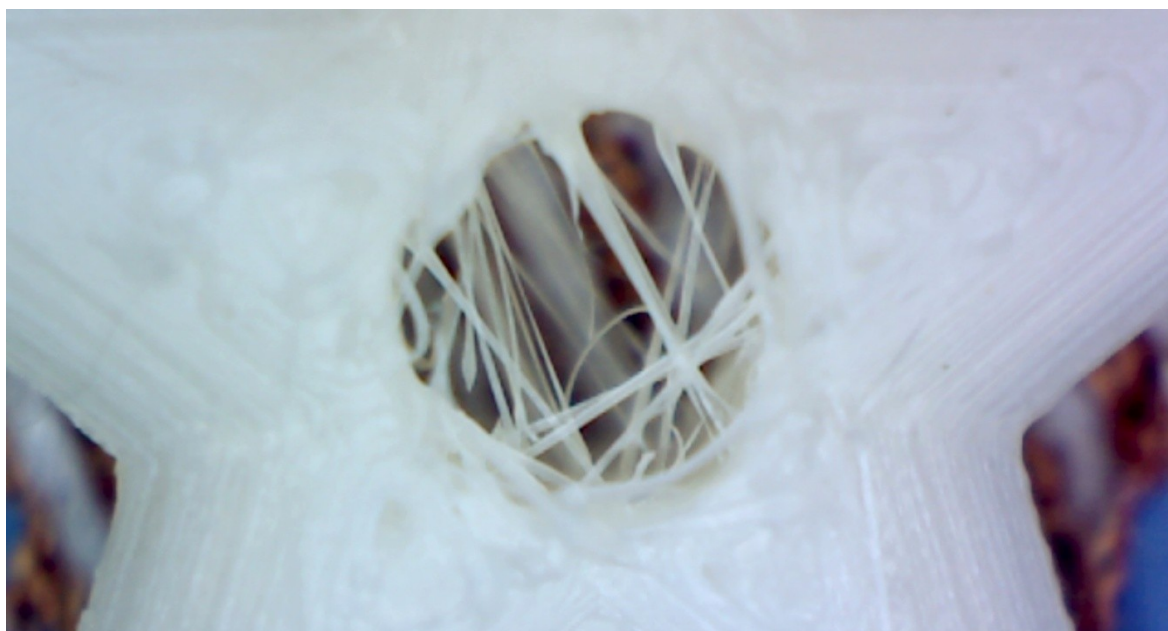
Výstupní hodnota maximálního rozdílu vrstev byla měřena pro pohled z boku na cíp hvězdy. Vzhledem k faktu, že tyto snímky hrany neobsahují žádnou referenční rovinu ani bod, od kterého by bylo možné objektivně měřit odchylku, bylo nutné měřit rozdíl pomocí dvou rovnoběžek umístěných do nejkrajnějších bodů cípu. Jejich vzájemná vzdálenost byla změřena pomocí kružnice, kdy střed ležel na jedné z nich a bod kružnice na druhé, viz obrázek č. 18. Tím byla odstraněna chyba měření úsečkou v případě jiné než kolmé vzdálenosti. Tato metoda byla opakována pouze jednou pro každou hranu, protože by výrazně narostla pracnost měření bez významného zvýšení přesnosti.



Obrázek č. 18 - Měření maximálního rozdílu vrstev cípu O, vzorku C4

7.3.4 Zmetky a chyby při tisku

Při tisku vzniklo pět zmetkových kusů z důvodu odlepení vzorku od stavební podložky nebo ucpání tiskové trysky. Jak již bylo zmíněno výše, při výrobě vzorku C7 došlo vysokou teplotou k ucpání trysky. Po opravě a konzultaci s vedoucím práce se tisk tohoto vzorku již neopakoval. Při návrhu 3D modelu se počítalo i s vyhodnocením vnitřních zaoblení otvoru, ten byl téměř u všech vzorků ucpáný přebytečným materiálem a s ohledem na možné poškození a změnu geometrie se otvor nečistil.



Obrázek č. 19 - Detailní pohled na ucpaný otvor ve vzorku A1

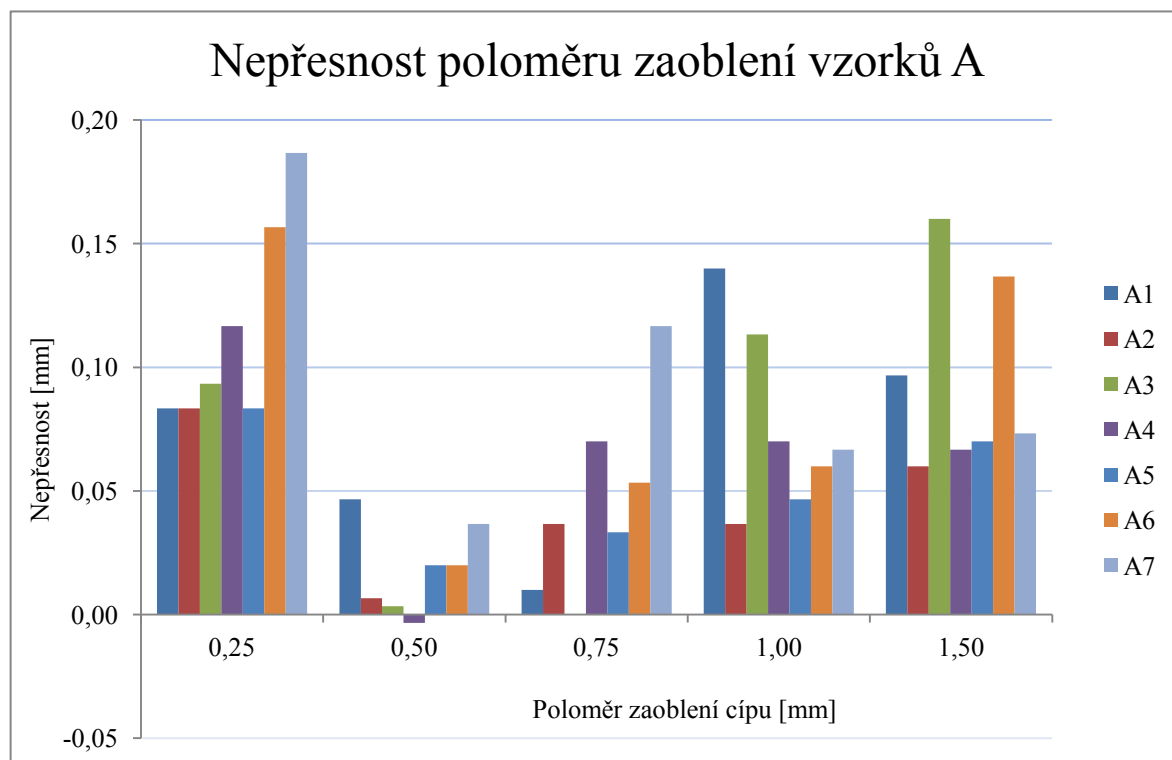
7.4 Vyhodnocení výsledků

Vyhodnocení bylo rozděleno do tří částí, jak pro nepřesnost zaoblení, tak pro maximální rozdíl vrstev. První metoda je pomocí grafu dílčích nepřesností, druhá metoda srovnává součet nepřesností a třetí metoda je pouze vizuální. Samozřejmě nelze srovnávat mezi sebou vzorky s jinou tloušťkou tiskové vrstvy, proto každá skupina má vlastní vyhodnocení. Dva nejlepší vzorky z každé skupiny byly znovu porovnány s ostatními nejlepšími vzorky.

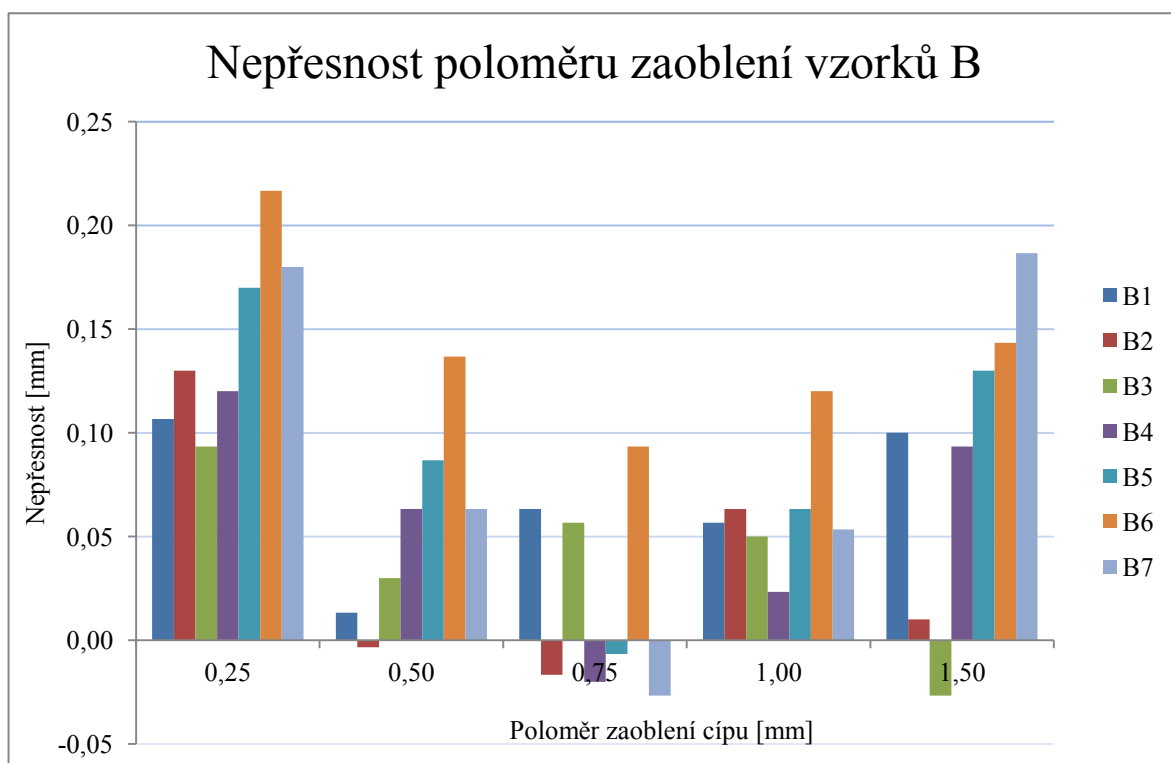
7.4.1 Vyhodnocení pomocí grafu

Graf je vytvořený pro každou skupinu tloušťky tiskové vrstvy zvlášť a zobrazuje dílčí nepřesnosti pro každý cíp hvězdy a všechny vzorky dané skupiny. Výsledku bylo docíleno postupným odstraňováním nejméně přesných vzorků a pořadí bylo zaznačeno do tabulky, viz tabulka č. 6 až 8.

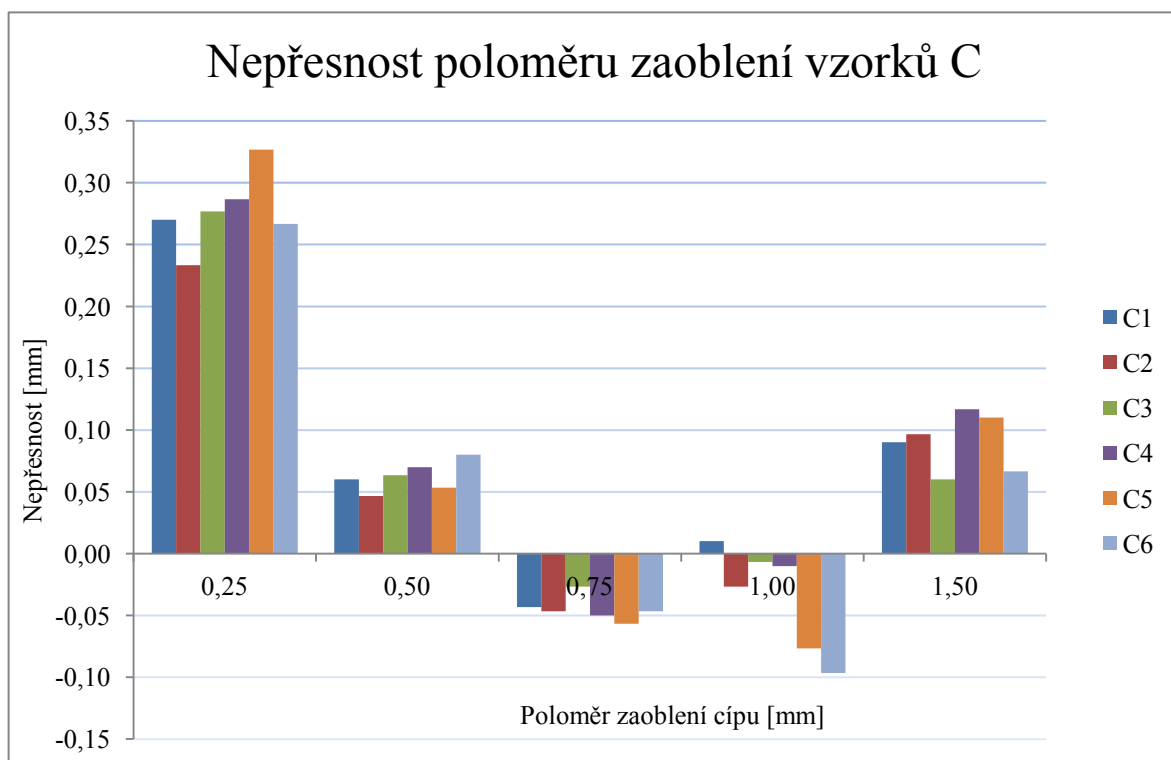
Největší nepřesnost poloměru zaoblení je většinou v grafech zaznačena pro hranu K. Je to způsobeno tím, že hrana má navržené zaoblení o poloměru 0,25 milimetru, avšak průměr otvoru trysky je pouze 0,3 milimetru. Toto zaoblení bylo navrženo záměrně, pro zjištění kvality a přesnosti vzniklého zaoblení o menším poloměru.



Graf č. 7 - Nepřesnost poloměru zaoblení vzorků skupiny A

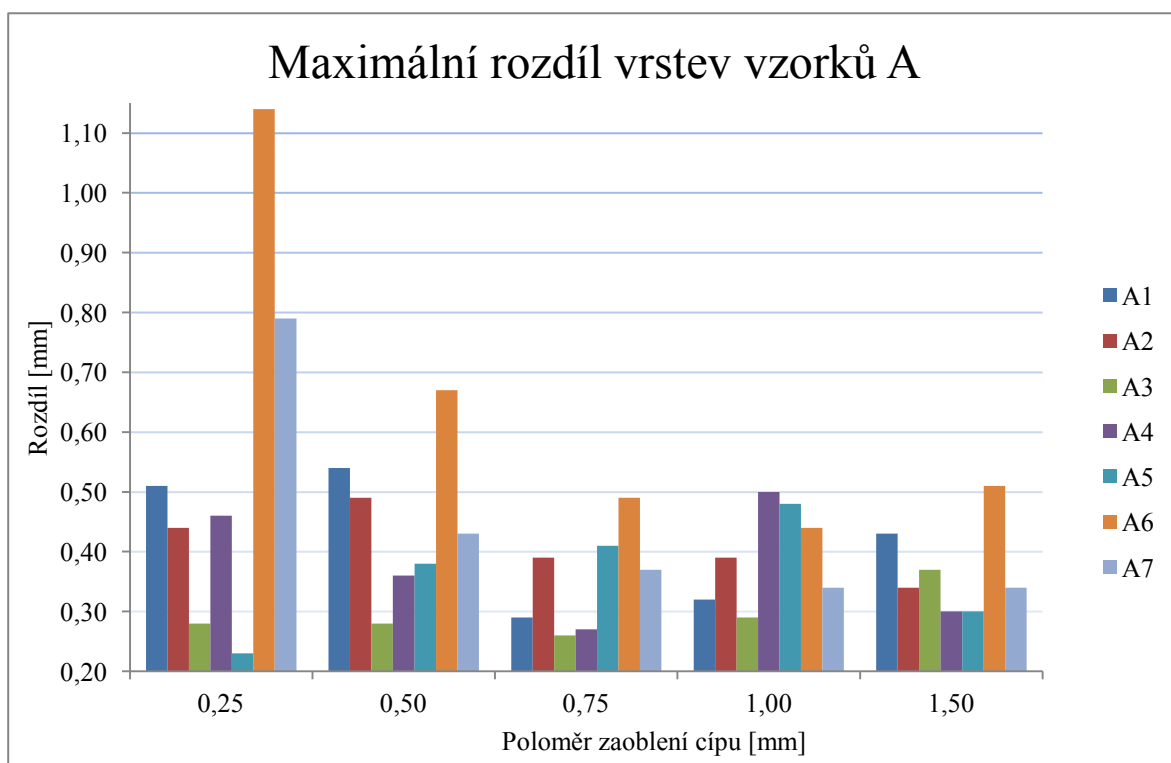


Graf č. 8 - Nepřesnost poloměru zaoblení vzorků skupiny B

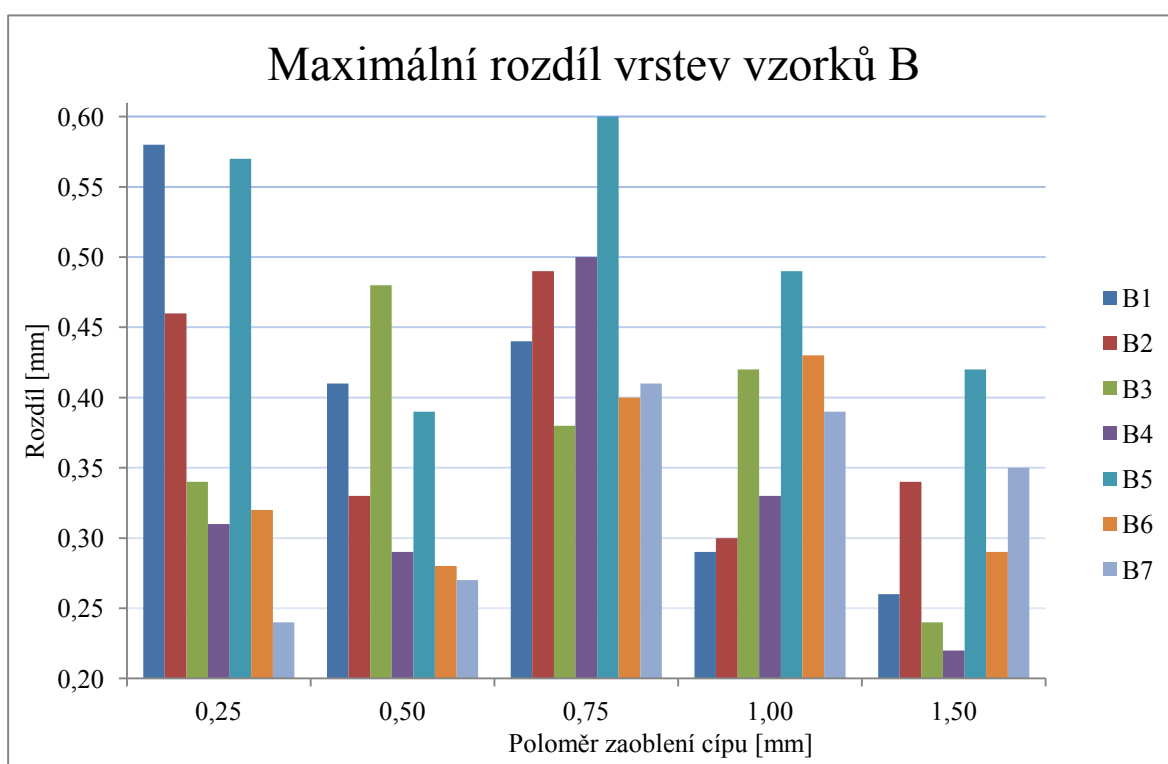


Graf č. 9 - Nepřesnost poloměru zaoblení vzorků skupiny C

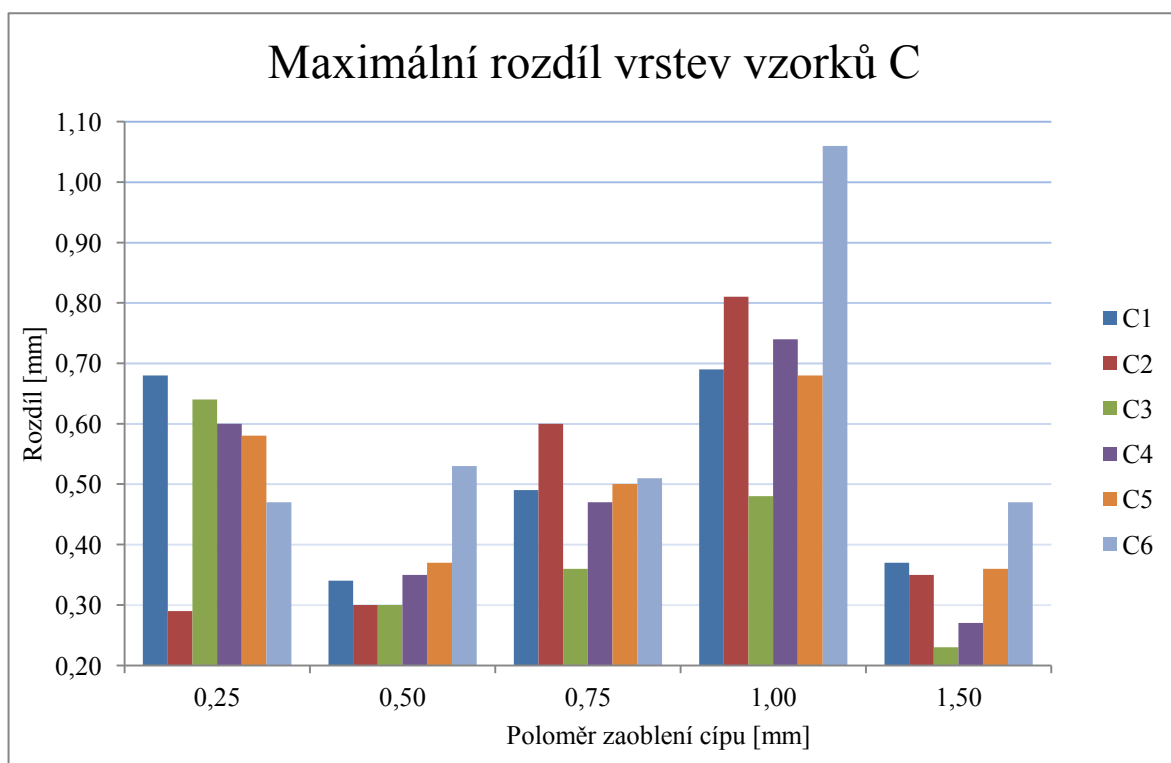
Z grafů č. 7 až 9 lze vyčíst, že nejlépe dopadly vzorky A2, B2 a C3. To naznačuje, že spíše nižší teplota prospívá přesnému tisku. Následující grafy taktéž vyjadřují dílčí nepřesnosti jednotlivých skupin, ale pro pohled z bokorysu. Jelikož byla měřena vzdálenost rovnoběžek, hodnoty mohou být pouze kladné.



Graf č. 10 - Maximální rozdíl vrstev vzorků skupiny A



Graf č. 11 - Maximální rozdíl vrstev vzorků skupiny B



Graf č. 12 - Maximální rozdíl vrstev vzorků skupiny C

Z grafů č. 10 až 12 lze vyčíst, že nejlépe dopadly vzorky A3, B7 a C3. Což pro skupiny A a C potvrzuje, že spíše nižší doporučená teplota zaručuje přesnost výrobku. Ve skupině B byly hodnoty rozdílů velmi vyrovnané a pět vzorků vykazovalo téměř totožné hodnoty. Přesné pořadí vyhodnocené z první metody je zapsáno v tabulkách č. 6 až 8.

7.4.2 Vyhodnocení součtem nepřesností

Druhá metoda vyhodnocení je početní. Využívá součet všech dílčích absolutních hodnot nepřesností zaoblení a součet maximálních rozdílů vrstev. Tyto přesné součty lze poté seřadit od nejmenší po největší, viz tabulky č. 2 až 4.

Vzorek	Součet absolutních nepřesností zaoblení	Pořadí	Součet maximálních rozdílů vrstev	Pořadí
[-]	[mm]	[-]	[mm]	[-]
A1	0,38	5.	2,09	5.
A2	0,22	1.	2,05	4.
A3	0,37	4.	1,48	1.
A4	0,33	3.	1,89	3.
A5	0,25	2.	1,80	2.
A6	0,43	6.	3,25	7.
A7	0,48	7.	2,27	6.

Tabulka č. 2 - Hodnoty a pořadí součtů nepřesností skupiny A

Vzorek	Součet absolutních nepřesností zaoblení	Pořadí	Součet maximálních rozdílů vrstev	Pořadí
[-]	[mm]	[-]	[mm]	[-]
B1	0,34	4.	1,98	6.
B2	0,22	1.	1,92	5.
B3	0,26	2.	1,86	4.
B4	0,32	3.	1,65	1.
B5	0,46	5.	2,47	7.
B6	0,71	7.	1,72	3.
B7	0,51	6.	1,66	2.

Tabulka č. 3 - Hodnoty a pořadí součtů nepřesností skupiny B

Vzorek	Součet absolutních nepřesností zaoblení	Pořadí	Součet maximálních rozdílů vrstev	Pořadí
[-]	[mm]	[-]	[mm]	[-]
C1	0,47	3.	2,57	5.
C2	0,45	2.	2,35	2.
C3	0,43	1.	2,01	1.
C4	0,53	4.	2,43	3.
C5	0,62	6.	2,49	4.
C6	0,56	5.	3,04	6.

Tabulka č. 4 - Hodnoty a pořadí součtů nepřesností skupiny C

Podle očekávání výsledky početní metody jsou velmi podobné výsledkům vyhodnocení pomocí grafů, protože jsou založeny na stejných hodnotách, pouze jsou zpracovány a vyhodnoceny odlišným způsobem. Z toho důvodu byla navržena třetí metoda vyhodnocení.

7.4.3 Vizuální vyhodnocení

Jedná se o metodu jednoduchého hodnocení podle snímků z mikroskopu, bez jakéhokoliv měření. Je hodnocena souvislost a tvar hrany nebo zaoblení, pokud hrana obsahuje díru nebo jiné výrazné deformace sníží se stupeň hodnocení o jedna. Principem hodnocení je známkování, kdy známka 1 znamená, že všechny hrany jsou v pořádku a známka 6 znamená že všech pět hran je nekvalitních. Každá hrana tedy může snížit známku pouze o jeden stupeň. Hodnocení je rozdělené pro zaoblení a pro cíp z bokorysu.

Pořadové č. vzorku	Skupina A		Skupina B		Skupina C	
	Zaoblení	Bokorys	Zaoblení	Bokorys	Zaoblení	Bokorys
[-]	[1-6]	[1-6]	[1-6]	[1-6]	[1-6]	[1-6]
1	3	3	2	4	2	5
2	1	2	1	3	1	4
3	1	2	1	1	2	4
4	1	3	1	2	2	4
5	1	3	1	5	3	4
6	2	6	1	4	4	6
7	2	3	1	3	-	-

Tabulka č. 5 - Vizuální hodnocení všech vzorků

Tabulka č. 5 dokazuje, že kvalita tisku je výrazně lepší při pohledu kolmo na stavební podložku. Tento fakt potvrzují i naměřené hodnoty nepřesností, které jsou několikanásobně vyšší pro cíp z bokorysu, než pro zaoblení, viz grafy č. 7 až 12.

7.4.4 Celkové vyhodnocení

Vyhodnocení proběhlo pomocí tří různých metod, protože dosažení kvalitního výrobku je pojem velmi rozsáhlý a komplexní. Sjednocením všech tří hodnocení je možné dosáhnout rozsáhlého rozboru a kontroly stabilních kvalit vzorků. Celkové pořadí bylo určeno součtem dílčích hodnocení, to znamená že menší součet je lepší výsledek.

Vzorek	Graf zaoblení	Součet nepřesností zaoblení	Vizuální kontrola zaoblení	Graf cípu	Součet rozdílů cípů	Vizuální kontrola bokorysu	Σ	Pořadí
[-]	[pořadí]	[pořadí]	[1-6]	[pořadí]	[pořadí]	[1-6]	[-]	[pořadí]
A1	5	5	3	5	5	3	26	5.
A2	1	1	1	4	4	2	13	2.
A3	4	4	1	1	1	2	13	2.
A4	3	3	1	3	3	3	16	4.
A5	2	2	1	2	2	3	12	1.
A6	6	6	2	7	7	6	34	7.
A7	7	7	2	6	6	3	31	6.

Tabulka č. 6 - Celkové vyhodnocení vzorků skupiny A

Vzorek	Graf zaoblení	Součet nepřesností zaoblení	Vizuální kontrola zaoblení	Graf cípu	Součet rozdílů cípů	Vizuální kontrola bokorysu	Σ	Pořadí
[-]	[pořadí]	[pořadí]	[1-6]	[pořadí]	[pořadí]	[1-6]	[-]	[pořadí]
B1	4	4	2	5	6	4	25	2.
B2	1	1	1	6	5	3	17	3.
B3	2	2	1	4	4	1	14	2.
B4	3	3	1	2	1	2	12	1.
B5	5	5	1	7	7	5	30	7.
B6	7	7	1	3	3	4	25	5.
B7	6	6	1	1	2	3	19	4.

Tabulka č. 7 - Celkové vyhodnocení vzorků skupiny B

Vzorek	Graf zaoblení	Součet nepřesností zaoblení	Vizuální kontrola zaoblení	Graf cípu	Součet rozdílů cípů	Vizuální kontrola bokorysu	Σ	Pořadí
[-]	[pořadí]	[pořadí]	[1-6]	[pořadí]	[pořadí]	[1-6]	[-]	[pořadí]
C1	2	3	2	4	5	5	21	4.
C2	3	2	1	5	2	4	17	2.
C3	1	1	2	1	1	4	10	1.
C4	4	4	2	2	3	4	19	3.
C5	6	6	3	3	4	4	26	5.
C6	5	5	4	6	6	6	32	6.

Tabulka č. 8 - Celkové vyhodnocení vzorků skupiny C

Vzorek	Graf zaoblení	Součet nepřesností zaoblení	Vizuální kontrola zaoblení	Graf cípu	Součet rozdílů cípů	Vizuální kontrola bokorysu	Σ	Pořadí
[-]	[pořadí]	[pořadí]	[1-6]	[pořadí]	[pořadí]	[1-6]	[-]	[pořadí]
A2	1	1	1	6	6	2	17	5.
A3	5	5	1	1	1	2	15	2.
A5	2	2	1	2	3	3	13	1.
B3	3	3	1	4	4	1	16	3.
B4	4	4	1	3	2	2	16	3.
C2	7	7	1	7	7	4	33	7.
C3	6	6	2	5	5	4	28	6.

Tabulka č. 9 - Celkové vyhodnocení nejlepších vzorků

Nejlépe hodnocené vzorky tedy jsou A5, B4 a C3, viz tabulky č. 6 až 8. Což znamená, že pro skupinu C začal experiment optimální teplotou a s nižším parametrem tiskové vrstvy by měla teplota narůstat o 10 °C. Podle očekávání, nejlepší tiskové kvality ze všech dvaceti vzorků vytvořených pro experiment, dosáhnul vzorek ze skupiny A, viz tabulka č. 9.

8. Závěr

Řešená bakalářská práce je ve své teoretické části zaměřena na rozbor problematiky technologie 3D tisku a současný stav využití ve výrobní i nevýrobní sféře. Rešerše začíná krátkým pohledem do historie a vývoje technologie a navazuje aktuální situací. Popisuje základní principy technologií, které jsou souhrnně označovány jako 3D tisk nebo aditivní výroba. Teoreticky rozebírá postup tisku a faktory ovlivňující výslednou kvalitu vyráběných součástí. Názorně ukazuje nejpokrokovější trendy v oblasti navrhování a optimalizace sestav a částečně ukazuje i na využití hybridních technologií a zapojení 3D tisku do další průmyslové revoluce. Na závěr jsou shrnuty výhody a nevýhody, kterými disponuje technologie 3D tisku.

Výsledky provedeného experimentu jsou platné pouze pro použitou tiskárnu a konkrétní materiál, jak bylo popsáno v kapitole 3.6 *Vliv tiskových parametrů na kvalitu tisku*, je mnoho aspektů, které ovlivňují výsledky tisku a použité vybavení rozhodně patří mezi ně. Porovnávat více tiskáren se stejným záměrem zjištění optimálních tiskových parametrů by bylo již nad rámec řešené práce a mohlo by být řešeno v diplomové práci. Při experimentu byla sledována orientačně i spotřeba materiálu, jak jsem již zmínil výše, přesné sledování spotřeby i váhových ztrát materiálu v závislosti na teplotě, by bylo vhodné téma pro další bakalářskou práci.

Experimentální zjištění optimálních tiskových parametrů proběhlo na 3D tiskárně EASY3DMAKER, která se řadí mezi hobby a poloprofesionální tiskárny. Tiskové parametry, které byly zjišťovány pomocí experimentu, jsou tloušťka tiskové vrstvy a teplota trysky. Vybraná tiskárna nabízí tři tloušťky tiskové vrstvy od 0,08 milimetru, do 0,25 milimetru. Při experimentu byl využit teplotní rozsah trysky od 210 °C po 270 °C, respektive 280 °C pro první tiskovou vrstvu. Tento interval je rozsáhlejší, než interval doporučených tiskových teplot pro materiál ABS, který byl k experimentu použit. Experiment byl zaměřen na přesnost tisku vnějších zaoblení.

Po tisku všech vzorků proběhlo snímkování pod digitálním mikroskopem a následně měření pomocí softwaru. Výsledky byly zaznamenány do tabulky v příloze a poté vypočteny hodnoty nepřesností a rozdílů. Pomocí více postupů bylo provedeno hodnocení jednotlivých vzorků, pro každou tloušťku tiskové vrstvy. Nejlépe vyhodnocené vzorky byly s označení A5, B4 a C3. Pro tloušťku tiskové vrstvy 0,08 milimetru byla zjištěna optimální teplota trysky 250 °C, pro tloušťku tiskové vrstvy 0,125 milimetru byla zjištěna

optimální teplota trysky 240 °C a pro tloušťku tiskové vrstvy 0,25 milimetru byla zjištěna optimální teplota trysky 230 °C.

Odstupňování teploty u výsledků potvrdilo předpoklad, protože při větší tloušťce vrstvy je do každého místa tisku přidáno více materiálu o dané teplotě, tudíž vychladnutí a zpevnění probíhá déle. Proto se vzorky s větší tloušťkou vrstvy mnohem více roztekly do stran a vznikly výraznější rozdíly mezi vrstvami, než u vzorků s menší tloušťkou vrstvy pro stejnou teplotu. Vzorky, které dostaly nejlepší hodnocení rozhodně považují za kvalitní a splnily očekávání přesnosti výroby.

Seznam použité literatury

- [1] *historie 3D tisku | o3D.cz* [online]. [vid. 2017-01-10]. Dostupné z: <http://www.o3d.cz/3d-tisk/%C5%A1%C3%ADtky/historie-3d-tisku/>
- [2] *Historie 3D tisku | 3D Tisk* [online]. [vid. 2017-01-10]. Dostupné z: <http://3dtisk.vujo.cz/historie-3d-tisku/>
- [3] *Selective Laser Sintering, Birth of an Industry - Department of Mechanical Engineering* [online]. [vid. 2017-01-10]. Dostupné z: <http://www.me.utexas.edu/news/news/selective-laser-sintering-birth-of-an-industry>
- [4] VITA, Mikael. *The Capabilities of the Fused Deposition Modeling Machine Ultimakes and its Adjusting for the Bio-medical Research Purposes*. [online]. Tampere, 2013. Faculty of Engineering Sciences. Tampere University of Technology. Dostupné z: <http://dspace.cc.tut.fi/dpub/bitstream/handle/123456789/22229/virta.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [5] HOMOLA, Jan. *Se 3D pery 3Doodler a SwissPen můžete ve vzduchu „kreslit“ fyzické objekty » 3D tisk* [online]. [vid. 2017-01-11]. Dostupné z: <http://www.3d-tisk.cz/se-3d-pery-3doodler-a-swisspen-muzete-ve-vzduchu-kreslit-fyzicke-objekty/>
- [6] HOMOLA, Jan. *Markforged hodlá výrazně zlevnit aditivní výrobu z kovů • Nově představená 3D tiskárna Metal X přichází s technologií ADAM » 3D tisk* [online]. [vid. 2017-01-11]. Dostupné z: <http://www.3d-tisk.cz/markforged-hodla-vyrazne-zlevnit-aditivni-vyrobu-z-kovu-%e2%80%a2-nove-predstavena-3d-tiskarna-metal-x-prichazi-s-technologie-adam/>
- [7] Prusa Research s.r.o. *Prusa Research s.r.o. - 3D tisk a 3D tiskárny od Josefa Průši* [online]. [vid. 2017-01-11]. Dostupné z: <http://www.prusa3d.cz/>
- [8] GIBSON, Ian, David W. ROSEN a Brent STUCKER. *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing* [online]. B.m.: Springer Science & Business Media, 2009. Dostupné z: https://books.google.cz/books?id=jcFs0VVVi9OAC&printsec=frontcover&hl=cs&source=gbg_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
- [9] What is 3D Printing? The definitive guide. *3D Hubs* [online]. [vid. 2017-01-09]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/what-is-3d-printing>
- [10] HOMOLA, Jan. *Voxeljet » Co by měly slévárny vědět o 3D tisku* [online]. [vid. 2017-01-11]. Dostupné z: <http://www.mcae.cz/voxeljet/co-by-mely-slevarny-vedet-o-3d-tisku/>
- [11] *První 3D tištěný dům vyrobí v Amsterdamu | o3D.cz* [online]. [vid. 2017-01-11]. Dostupné z: <http://www.o3d.cz/3d-tisk/2014/04/prvni-3d-tisteny-dum-vyrobi-v-amsterdamu/>
- [12] NOVÁK, Jan. 3D tisk, to jsou také podpěry a dokončovací operace. *Konstruktor* [online]. nedatováno, 2016(3). Dostupné z: <http://www.konstrukter.cz/>

- [13] *3D tiskárny (+příslušenství) : 3D Systems Cube3 bílá* [online]. [vid. 2017-01-12]. Dostupné z: <https://www.abc3d.cz/3d-tiskarny-top/cube3>
- [14] *QuickMesh - Features overview* [online]. [vid. 2017-01-14]. Dostupné z: http://www.quickmesh.net/features_overview.html
- [15] LARSSON, Jan. Aditivní a hybridní výroba vyvolávají mnoho otázek. *Konstruktér*. nedatováno, 2016(3).
- [16] HOMOLA, Jan. *Kancelářský ProJet MJP 2500Plus s voskovými rozpustnými podpěrami tiskne od léta i v Česku » 3D tisk* [online]. [vid. 2017-01-19]. Dostupné z: <http://www.3d-tisk.cz/kancelarsky-projet-mjp-2500plus-s-voskovymi-rozpustnymi-podperami-tiskne-od-lea-i-v-cesku/>
- [17] HOMOLA, Jan. Hybridní výroba odhaluje dříve nevídané možnosti. *Konstruktér*. nedatováno, 2015(4).
- [18] POHOŘELSKÝ, Zbyněk. 3D tisk - Teplota trysky, rychlost tisku a materiál. *Inventor 3D blog* [online]. 6. únor 2017 [vid. 2017-05-07]. Dostupné z: <https://www.inventor3dblog.cz/3d-tisk-teplota-trysky-rychlost-tisku-material/>
- [19] REKTOŘÍK, Luděk. 3D tisk s podporou PTC Creo. *Konstruktér* [online]. nedatováno, 2016(3). Dostupné z: <http://www.konstrukter.cz/>
- [20] HOMOLA, Jan. Porsche hostilo konferenci o budoucnosti konstruování. *Konstruktér* [online]. nedatováno, 2015(4). Dostupné z: <http://www.konstrukter.cz/>
- [21] SCOTT, Clare. Thales Alenia Space Looks to Space with Large Qualified 3D Printed Satellite Components and a New Collaboration. *3DPrint.com | The Voice of 3D Printing / Additive Manufacturing* [online]. 13. červenec 2016 [vid. 2017-04-12]. Dostupné z: <https://3dprint.com/142012/thales-alenia-components/>
- [22] HOMOLA, Jan. Formnext 2016 odhalil industrializaci aditivní výroby. *Konstruktér*. nedatováno, 2016(4).
- [23] HOMOLA, Jan. Concept Laser umožňuje měnit parametry při 3D tisku z kovů. *Konstruktér*. nedatováno, 2016(4).
- [24] *O nás - Aroja, s.r.o.* [online]. [vid. 2017-04-24]. Dostupné z: <http://aroja.cz/o-nas.html>
- [25] *Easy3DMaker* [online]. [vid. 2017-04-24]. Dostupné z: <http://www.3dfactories.com/3d-printers/easy3dmaker/>
- [26] *Deluxe Handheld Digital Microscope* [online]. [vid. 2017-05-01]. Dostupné z: <http://www.celestron.com/browse-shop/microscopes/digital-microscopes/deluxe-handheld-digital-microscope>
- [27] *Rapid Prototyping* [online]. [vid. 2017-04-25]. Dostupné z: <http://www.3dfactories.com/applications/rapid-prototyping/>
- [28] ERMIS, Jan. *Strategie 3D tisku tiskárny EASY 3D MAKER*. Ostrava, 2016. Bakalářská práce. VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské technologie.

- [29] *Slic3r Manual - Infill Patterns and Density* [online]. [vid. 2017-05-01]. Dostupné z: <http://manual.slic3r.org/expert-mode/infill>
- [30] Materiály. *Prusa3D - 3D Printers from Josef Průša* [online]. [vid. 2017-04-23]. Dostupné z: <http://www.prusa3d.cz/materialy/>
- [31] S.R.O, 4ISP spol. *Použití materiálu ABS* [online]. [vid. 2017-04-23]. Dostupné z: <https://www.easycnc.cz/inpage/abs/>
- [32] 3D tiskové materiály - doporučené nastavení. *3D tiskárna* [online]. [vid. 2017-04-23]. Dostupné z: <http://www.3dtiskarny.info/3d-tiskove-materialy-doporucena-nastaveni/>

Seznam příloh

Příloha A - Model hvězdy pro experiment ve formátu ipt v elektronické příloze

Příloha B - Soubory formátu gcode pro všechny testované modely v elektronické příloze

Příloha C - Tabulka měření vzorků v elektronické příloze

Práce byla podpořena ze Studentské grantové soutěže Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava v rámci projektů SP2017/147 Specifický výzkum v oblasti výrobních technologií a SP2017/149 Výzkum produktivních a ekologicky úsporných výrobních technologií s cílem zvýšit a podpořit vědecko-výzkumné aktivity studentů doktorských a navazujících magisterských studijních programů ve spolupráci s akademickými pracovníky.